

Prof.Dr Zvonko Tomanović,dipl.inž.građ.

UNIVERZITET CRNE GORE  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

# **TUNELI I PODZEMNE KONSTRUKCIJE**

AUTORIZOVANI TEKST PREDAVANJA  
- SKRIPTA -

Podgorica, septembar 2015.

## SADRŽAJ

UVOD .....	4
<b>1. ISTORIJSKI RAZVOJ, PODJELA I OSNOVNI ELEMENTI PODZEMNIH OBJEKATA</b>	<b>6</b>
1.1. Istorijski razvoj izgradnje podzemnih objekata .....	6
1.2. Podjela podzemnih objekata .....	7
1.3. Elementi poprečnog presjeka podzemnog objekta .....	8
1.3.1. Načela za određivanje položaja i poprečnog presjeka tunela .....	9
1.4. Dreniranje i hidroizolacija tunela pri izgradnji i u eksploataciji pri izgradnji i u eksploataciji .....	18
1.5. Prateći sistemi saobraćajnih tunela .....	21
1.5.1. Osvjetljenje .....	21
1.5.2. Ventilacija tunela - provjetravanje .....	22
1.5.3. Energetska postrojenja .....	25
1.5.4. Protiv požarna zaštita u saobraćajnim tunelima .....	25
1.5.5. Ostale instalacije u putnim tunelima .....	26
<b>2. STANJE NAPONA OKO PODZEMNOG OTVORA</b>	<b>29</b>
2.1. Prirodno stanje napona u terenu (prirodna napregnutost) .....	29
2.1.1. Teoretski pristup definisanja polja primarnih napona .....	30
2.1.2. Definisanje polja primarnih i sekundarnih napona mjerenjem na terenu ....	33
2.2. Sekundarno stanje napona oko otvora u stijenskoj masi .....	37
2.2.1. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora .....	38
2.2.2. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora sredina <i>ELASTIČNA</i> - primarno stanje napona <i>IZOTROPNO</i> .....	40
2.2.3. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora sredina <i>ELASTIČNA</i> - primarno stanje napona <i>ANIZOTROPNO</i> , Kiršovo rješenje .....	41
2.2.4. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora sredina <i>ELASTIČNA</i> - primarno stanje napona <i>IZOTROPNO</i> , radijalno reaktivno opterećenje na konturi .....	44
2.2.5. Sekundarno ravno stanje napona oko elipsastog otvora u elastičnoj sredini .....	45
2.3. Formiranje kvaziplastične zone oko iskopa – prekoračenje napona elastičnog ponašanja i pojava zone plastičnosti .....	45
2.4. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora sa zonom granične ravnoteže (Kastnerovo rješenje, 1949) .....	47
2.5. Metoda za grafičko određivanje zone granične ravnoteže ( $r_o$ ) .....	49

### 3. GEOTEHNIČKE OSNOVE ZA PROJEKTOVANJE TUNELA

51

3.1. Geološke i inženjersko geološke osnove za formiranje modela za dimenzionisanje podzemnih konstrukcija (istražni radovi, geološko-inženjerske karte, prognozni inženjersko-geološki profili, definisanje kvazihomogenih zona) .....	51
3.1.1. Istražni radovi .....	51
3.1.2. Inženjersko geološke podloge .....	51
3.1.3. Definisanje kvazihomogenih zona po parametru ispucalosti .....	53
3.2. Grafička prezentacija geoloških podataka (Korišćenje stereografske projekcije za prikazivanje slojevitosti stijenske mase) .....	54
3.2.1. Projekcije jednakih površina i jednakih uglova .....	55
3.2.2. Elementi koji definišu diskontinuitet – definicija pojmova .....	56
3.2.3. Stereografske projekcije ravni i njenog pola .....	56
3.2.4. Prikaz geoloških termina .....	57
3.2.5. Položaj projekcije pola diskontinuiteta (slojeva) u odnosu na pravac pružanja tunela .....	59
3.3. Tipovi tunelskog iskopa prema GN 206 .....	60
3.4. Empirijske klasifikacije stijenskih masa .....	61
3.4.1. Klasifikacija Protođakonova .....	62
3.4.2. Klasifikacija Deer-a .....	62
3.4.3. Geomehanička klasifikacija ili RMR sistem .....	62
3.4.4. Q - sistem .....	63
3.4.5. Definisanje podgradne konstrukcije prema geotehničkim klasifikacijama stijenske mase .....	65
3.5. Povezanost tehnologije građenja i svojstava stijenske mase .....	66

### 4. PRITISCI NA PODGRADNU KONSTRUKCIJU I DIMENZIONISANJE

67

4.1. Teorija rasteretnog svoda .....	67
4.1.1. Rješenje K. Terzaghi-ja, za rov sa nadslojem .....	67
4.1.2. Rješenje paraboličnog rasteretnog svoda po Protođakonovu (1908) .....	69
4.2. Principi dimenzionisanja tunelske konstrukcije .....	70
4.2.1. Uticaj izlomljenosti stijene na odabir tipa podgradne konstrukcije, statičkog proračuna i dimenzionisanje .....	71
4.3. Svojstva diskontinuiteta – otpornost na smicanje .....	75
4.3.1. Svojstva diskontinuiteta .....	75
4.3.2. Otpornost diskontinuiteta na smicanje .....	76
4.4. Osiguranje od ispadanja blokova kod izlomljene stijene .....	78
4.4.1. Analiza stabilnosti bloka klizanjem po jednoj ravni .....	78
4.5. Statički proračun tunelske konstrukcije (vrlo izlomljene stijenske mase) .....	79
4.5.1. Raščlanjeni statički sistem .....	79
4.5.2. Winkler-ov model .....	80
4.5.3. Proračuni zasnovani na primjeni <i>metode konačnih elemenata (MKE)</i> i <i>metode graničnih elemenata (MGE)</i> .....	80

4.5.4. Semiempirijski postupci statičkih proračuna .....	81
4.6. Naponi u tunelskoj oblozi u uslovima rotacione simetrije. Interakcija betonske obloge i stijene. Karakteristična kriva stijenske mase .....	85
4.6.1. Tanka obloga .....	85
4.6.2. Debela obloga .....	85
4.6.3. Koncept „karakteristične krive“ stijenske mase .....	87
4.7. Hidrotehnički tuneli – sadejstvo betonske obloge i stijenske mase .....	88

## **5. METODE I TEHNOLOGIJA IZGRADNJE PODZEMNIH OBJEKATA**

**90**

5.1. Izrada lakih tunelskih iskopa, osnovi primjene eksploziva u podzemnim iskopima .....	90
5.1.1. Definicija i osnovne vrste eksploziva koji se koriste u tunelogradnji .....	90
5.1.2. Dejstvo mine i optimizacija miniranja .....	92
5.2. Savremena podgradna konstrukcija – srednje teški tunelski iskopi (ankeri i sidra, prskani beton, armaturne mreže) .....	100
5.2.1. Ankeri i sidra .....	102
5.2.2. Prskani beton (mlazni beton, torkret) .....	105
5.3. Tradicionalna (klasična) podgradna konstrukcija, materijali, faze izvodjenja .....	107
5.3.1. Iskop odozgo naniže i betoniranje odozgo naniže .....	108
5.3.2. Iskop i izrada obloge po perimetru odozdo naviše .....	108
5.3.3. Iskop odozgo naniže i betoniranje odozdo naviše .....	108
5.4. Primjena otvorenog i zatvorenog štita i montažne podgradne konstrukcije - teški i vrlo teški tunelski iskopi .....	109
5.4.1. Montažna podgrada .....	110
5.4.2. Monolitizacija montažne podgrade .....	111
5.5. Injektiranje u tunelima .....	111
5.6. Portalne građevine .....	113
5.7. Sanacija i rekonstrukcija saobraćajnih tunela .....	116

<b>Literatura .....</b>	<b>117</b>
-------------------------	------------

## UVOD

Podzemne konstrukcije i tuneli kao rijetko koji građevinski objekti obuhvataju širok spektar oblasti građevinarstva koje se međusobno usko prepliću i međusobno uslovljavaju. Tako geološka sredina uslovljava izbor tehnologije iskopa, koja opet posredno utiče na nivo pritisaka stijenske mase i na izbor podgradne konstrukcije (privremene i stalne). Izbor mašina utiče na količinu štetnih gasova i dima koji se oslobađa u toku građenja pa tako ima direktan uticaj na izbor ventilacionog sistema u toku izvođenja radova. U toku eksploatacije kod putnih tunela, naprimjer, od dužine tunela i broja vozila koja prolaze kroz tunel u jedinici vremena zavisi koji će sistem ventilacije biti primjenjen. U zavisnosti od tipa ventilacije u tunelu treba obezbjediti prostor za smještanje energetskih postojenja (trafostanice, kanali za kablove itd.). Ventilacioni sistem mora biti povezan sa protivpožarnim sistemom koji je u vezi sa sistemom za signalizaciju i kontrolu toka saobraćaja.

Iz ovog sasvim kratkog opisa može se uočiti da je projektovanje i građenje podzemnih objekata i tunela vrlo kompleksan proces u kojem postoji velika međuzavisnost između: geološko-geotehničkih uslova stijenske sredine, primjenjene tehnologije iskopa, podgrađivanja, namjene objekta (saobraćajni, industriski, vojni, itd.), pratećih sistema (osvjetljenje, ventilacija, signalizacija), protivpožarnih uslova i td. Imajući u vidu izneseno, čitalac literature koja obrađuje ovu problematiku (pa i ovaj tekst za kurs na osnovnim studijama iz Predmeta podzemne konstrukcije i tuneli) treba da bude svjestan činjenice da je materiju vrlo teško sistematizovati tako da se dio problema koji se dominantno tretira u okviru jednog naslova ili poglavlja ponovno ne dotiče u manjem ili većem obimu, jer se pri tretiranju nekog drugog problema pojavljuje korelacija ili poseban aspekt na neki drugi problem koji je već tretiran ili će biti tretiran u nastavku teksta.

Vodeću ulogu pri projektovanju i građenju tunela i podzemnih konstrukcija imaju građevinski inženjeri koji u procesu projektovanja i izgradnje prvenstveno treba da definišu tehnologiju izgradnje i da odgovarajućom podgradnom konstrukcijom obezbjede stabilnost stijenske mase u toku izgradnje i eksploatacije, ali i da sagledaju i sve prateće sadržaje i sisteme važne za statičku i funkcionalnu sigurnost objekta. Prema tome, naponsko deformacijska analiza nalazi centralno mjesto u opsegu odgovornosti građevinskih inženjera pa je dominantno i obrađena u ovom kursu, dok su drugi aspekti obuhvaćeni na nivou koji obezbjeđuje sagledavanje objekta kao građevinske i funkcionalne cjeline (ventilacija, osvjetljenje, protivpožarna zaštita, signalizacija, i drugo).

Dalje detaljnije izučavanje podzemnih konstrukcija i tunela zavisi uglavnom od namjene objekta. Saobraćajni tuneli su predmet posebne pažnje u pogledu vođenja trase i pratećih sadržaja, kod hidrotehničkih tunela poseban problem predstavljaju tuneli pod visokim pritiskom vode (sa aspekta nosivosti i vodonepropusnosti), a objekti posebne namjene kao što su podzemni rezervoari ili skladišta radioaktivnog otpada imaju specifičnu problematiku.

## Sadržaj teksta predavanja

U prvom poglavlju, *Istorijski razvoj i podjela podzemnih objekata*, daje se kratak istorijski pregled razvoja građenja tunela i podzemnih objekata, podjele i osnovni elementi podzemnih objekata i tunela. U ovom poglavlju se daje kratak opis problema koji obuhvataju tuneli i podzemne konstrukcije i načela za određivanje položaja i gabarita.

U drugom poglavlju, *Stanje napona oko podzemnog otvora*, uglavnom se izlažu osnove naponsko deformacijske analize oko kružnog otvora u elastičnom, homogenom i izotropnom materijalu, kao osnova za kvalitativnu i kvantitativnu analizu problema. Kada naponi u stijeni prekorače granicu elastičnosti, tada se oko otvora formira kvazi plastična zona. U ovom poglavlju se, takođe, definišu uslovi za formiranje zone plastifikacije i bazični model za naponsko deformacijsku analizu koja se sprovodi pri ovom stanju napona.

Treće poglavlje, *Geotehničke osnove za projektovanje tunela*, bavi se geološkim i geotehničkim osnovama za formiranje matematičkog modela pri naponsko deformacijskoj analizi. Posebno se tretira način prezentacije prikupljenih geotehničkih podataka (prvenstveno diskontinuiteta). U ovom poglavlju se iznose i kategorizacije i empirijske klasifikacije stijenskih masa vezane za tehnologiju iskopa i stabilnost podzemnog otvora.

U četvrtom poglavlju, *Pritisaci stijenske mase i dimenzionisanje podgradne konstrukcije*, se proučavaju bazični koncepti definisanja podzemnog pritiska na podgradnu konstrukciju, modeli za proračun statičkih uticaja u podgradnoj konstrukciji i dimenzionisanje klasične betonske podgrade. Takođe, daju se osnove primjene metode konačnih elemenata (MKE) i metode graničnih elemenata (MGE) pri diskretizaciji stijenske mase u cilju definisanja podzemnih pritisaka.

Peto poglavlje, *Metode i tehnologija izgradnje podzemnih objekata*, se bavi metodama iskopa podzemnog objekta i izgradnje podgradne konstrukcije na tradicionalan (klasičan, konzervativan) način i primjenom savremenih tehnoloških postupaka u različitim uslovima kvaliteta – kompetentnosti prirodne stijenske sredine.

# 1. ISTORISKI RAZVOJ, PODJELA I OSNOVNI ELEMENTI PODZEMNIH OBJEKATA

## 1.1. Istorijski razvoj izgradnje podzemnih objekata

Počeci procjene stabilnosti stijenske mase i korišćenja pozemnih prostorija vezuju se za pećinskog čovjeka koji je koristio prirodne pećine i kaverne za stanovanje. Prirodne pećine su dograđivali na najprimitivniji način u cilju poboljšanja uslova stanovanja. U toku istorijskog razvoja čovjeka nakon napuštanja pećina kao prebivališta usledila je relativno velika pauza u korišćenju podzemnih prostorija.

Na osnovu zapisa i arheoloških istraživanja može se utvrditi da je građenje podzemnih objekata bilo poznato u starom vijeku, i da je imalo procvat u doba robovlasničkog društvenog uređenja. U srednjem vijeku ova aktivnost je gotovo zamrla. Građenje podzemnih prolaza i tunela za snabdjevanje vodom bilo je razvijeno u doba Asiraca, Egipćana, Grka, Rimljana i drugih antičkih naroda. Imajući u vidu sredstva koja su im stajala na raspolaganju za iskop (dlijeta i čekići, grijanje stijene i naglo hlađenje vodom, zamrzavanje vode u pukotinama), objekti sagrađeni u to vrijeme zadivljuju smjelošću rješenja i tehničkim karakteristikama.

Nakon pronalaska baruta (1612. god.) i početka primjene u tehničke svrhe, a zatim pronalaska nitroglicerina (1847. god.) i bušaćeg čekića (1861. god.), rad na izgradnji tunela dobija na zamahu. Tako je započela relativno intenzivna izgradnja saobraćajnih tunela. Izgradnja prvog tunela na plovnim putevima vezuje se za Francusku (1676 – 1681) i tunel dužine 164m koji povezuje rijeku Garonu sa Sredozemnim morem.

Tunel "Toirre Noir" je kao prvi sagrađen u periodu od 1826. do 1833. godine za potrebe željeznice sa konjskom vučom (oko 1600m). Prvi tunel za potrebe željeznice sa parnom vučom na pruzi Liverpool – Mančester dužine 1190m pripisuje se samom pronalazaču parne mašine Džordžu Stivensonu (1826 – 1830). Usled procvata željezničkog saobraćaja, u Evropi i Americi se u drugoj polovini XIX i prvoj polovini XX vijeka izgrađuje veliki broj tunela. Najpoznatiji tuneli u Evropi iz ovog perioda su tuneli Sen-Gothard (1872 – 1882) - nalazi se na visini od 1200m, dužine 14 980m, poprečnog presjeka 7.4x8m za dva kolosjeka, i Simplon - dva paralelna jednokolosječna tunela (prvi 1895-1906, drugi 1912 – 1921) dužine 19 800m, koji željeznički povezuju Švajcarsku i Italiju. U tunelu Sen-Gothard 1875. godine prvi put je primjenjen dinamit. Treba istaći i značajne podzemne radove na izgradnji brzog šinskog transporta (metroi) u većim gradovima Evrope i Amerike u drugoj polovini XX vijeka.

Početak građenja tunela na putevima (u novije doba) se vezuje za tunel izgrađen 1707. godine, dužine 64m na starom Gothardskom prelazu Uner Loh. Od ovog perioda do danas je izgrađen veliki broj putnih tunela. Među najznačajnijim je ponovo Gothard dužine 17 000m, sa dvije paralelne tunelske cijevi sa po dvije saobraćajne trake.

U novije vrijeme ispod morskog dna izvođen je saobraćajni tunel La Manš (1988–1994) dužine oko 50km, a u Japanu tunel Seikan (1988. god.) dužine od oko 54 km.

Prvi željeznički tuneli u Srbiji su izgrađeni na pruzi Beograd – Niš (npr. Ripanjski tunel dužine 1900m, pušten u saobraćaj 1884. god.). Pruga Beograd – Bar ima 254 tunela ukupne dužine 114km, sa najdužim tunelima Sozina (6170m) i Zlatibor (6169m). Značajniji savremeni tuneli na putnoj mreži su tunel Palisad na Zlatiboru (dužine oko 300m), tunel Vrmac između Tivta i Kotora (oko 1600m) i tunel Sozina (4188m).

## **1.2. Podjela podzemnih objekata**

Podzemne prostorije mogu imati različitu namjenu. Iz namjene (funkcije) uglavnom proističu oblik i dimenzije podzemnog objekta. Bez obzira na raznolikost dimenzija i oblika u zavisnosti od odnosa poprečnog presjeka i dužine, podzemni objekti se mogu svrstati u dvije velike grupe: tunele i komore (kaverne).

Tunel je riječ koja dolazi iz engleskog jezika i odnosi se na cijevast podzemni prolaz koji ima veliku dužinu u odnosu na širinu poprečnog presjeka, i ima ulaz odnosno izlaz na dva kraja.

Komora (kaverna) je podzemna prostorija ograničene dužine i većeg poprečnog presjeka (istog reda veličine: dužine, širine i visine). Ulaz u komore je obično obezbjeđen pristupnim tunelom znatno manjeg poprečnog profila od poprečnog profila komore. Podzemni sistemi sačinjeni od jedne ili više komora sa pristupnim tunelom ili tunelima koji ih povezuju međusobno ili sa površinom terena nazivaju se podzemnim objektima.

Generalno, podzemne prostorije se mogu podijeliti na rudarske i građevinske podzemne prostorije. Podzemni objekti za rudarske namjene se baziraju na iskustvu i tehnici razvijenoj za potrebe rudarske eksploatacije ruda i rudnih bogatstava, i one uglavnom nisu predmet izučavanja i djelatnosti građevinskih inženjera, pa kao takve ovdje neće biti dalje tretirane.

Grupisanje građevinskih podzemnih prostorija (o kojima se govori nadalje u ovom kursu) se može izvršiti prema: namjeni, dužini, poprečnom presjeku, težini izvođenja, položaju u terenu, načinu izrade itd.

Prema namjeni podzemne prostorije se dijele na:

- Saobraćajne
- Hidrotehničke
- Komunalne
- Specijalne namjene



Saobraćajni tuneli se dalje dijele na:

- Tunele za željeznički saobraćaj
- Tunele za putni saobraćaj
- Tunele na plovnim putevima
- Tunele za gradski željeznički saobraćaj (metroi)
- Tunele za prolaz pješaka
- Mješovite

Hidrotehnički tuneli se prema pritisku vode dijele na:

- Tunele bez pritiska (voda se sprovodi slobodnim padom)
- Tunele pod pritiskom (protok vode je pod pritiskom)

Komunalni tuneli se izgrađuju u velikim gradovima za različite potrebe, i mogu se podjeleli na:

- Tunele za kanalizaciju
- Tunele za postavljanje cijevnih vodova (vodovodi, gasovodi i sl.)
- Tunele za postavljanje elektro instalacija

Podzemni objekti specijalne namjene se dijele na:

- Podzemne objekte vojne namjene (skladišta, hangari, skloništa za podmornice i sl.)
- Podzemna industrijska postrojenja (mašinske hale hidroelektrana, podzemne fabrike i sl.)
- Podzemne garaže i magacine
- Skloništa za civile u toku ratnih dejstava

Prema dužini (GN 206)<sup>1</sup> tuneli se dijele na:

- Vrlo kratki do 50 m'
- Kratki 50 – 100 m'
- Srednje dužine 500 – 2200 m'
- Dugačke 2200 – 4000 m'
- Vrlo dugačke preko 4000 m'

Prema poprečnom presjeku (GN 206) tuneli se dijele na:

- Tunelske cijevi do 5 m<sup>2</sup>
- Tunelske potkope (hodnike) 5 – 12 m<sup>2</sup>
- Tunele malog profila 12 – 27 m<sup>2</sup>
- Tunele srednjeg profila 27 – 56 m<sup>2</sup>
- Tunele velikog profila preko 56 m<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Naše važeće norme **GN 206**, dijele tunele prema: **dužini, površini poprečnog presjeka, po geološkom sastavu i strukturi tunelske konstrukcije**; donijete su 1952. godine i danas se mogu smatrati konzervativnim, ali još uvijek u pojedinim elementima suštinski odražavaju stvarne granice koji su od važnosti za rane faze projektovanja (procjena potrebe za vještačkom ventilacijom, osvjetljenjem i sl.)

Prema uslovima - težini izrade tj. geološkom sastavu (GN 206) tuneli se dijele na:

- dobre
- srednje teške
- teške
- veoma teške

Prema položaju u terenu tuneli se dijele na:

- Duboko položene tunele ispod površine terena
- Plitko položene tunele (tuneli izgrađeni u otvorenom iskopu)

Prema načinu izgradnje tuneli se dijele na:

- Tunele izgrađene podzemnim iskopom sa čela tunela
- Tunele izgrađene u otvorenom iskopu ("cut&cover")
- Tunele izgrađene u postupkom "potiskivanja" podgrade

Prema podgradi tuneli se dijele na:

- Nepodgrađene tunele (eventualno zaštita od prskanog betona)
- Tunele podgrađene samo u svodu (ili sa djelimičnim oporcima na spoju svodova)
- Potpuno podgrađene tunele

### **1.3. Elementi poprečnog presjeka podzemnog objekta (elementi konstrukcije, svijetli profil i izbor racionalnog oblika podgradne konstrukcije)**

Poprečni presjek tunela se sastoji od tunelske podgradne konstrukcije i svijetlog otvora, kako je to prikazano na slici 1.1. Osnovni elementi tunelske konstrukcije su: gornji svod (kalota), oporci (mureta), temelji i podnožni svod (invert). Podnožni svod (invert) nije obavezni dio tunelske konstrukcije već se primjenjuje samo kod tunela položenih u lošije stijenske mase. Tunelska konstrukcija se obično izvodi od neamiranog i armiranog betona.

Ukupna površina poprečnog presjeka tunela (bruto površina) se sastoji od površine konstrukcije i površine svijetlog otvora (neto površina). Dakle,

$$F = F_K + F_S$$

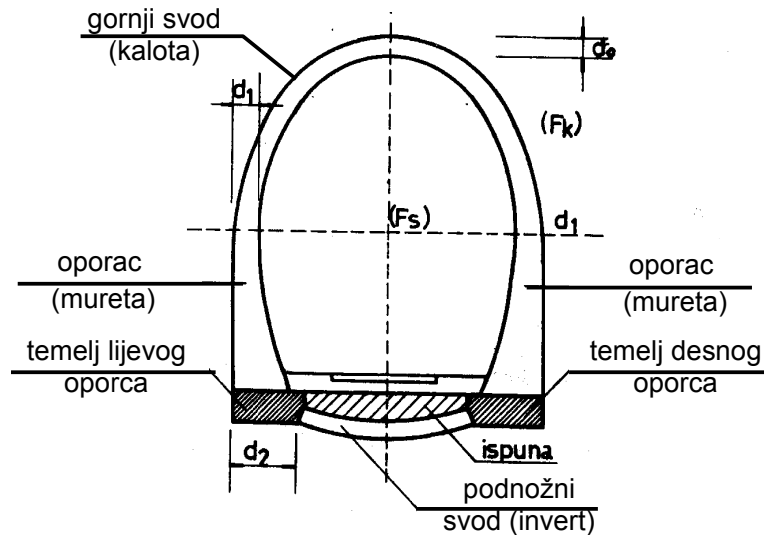
gdje su:

$F$  – ukupna površina poprečnog presjeka

$F_K$  – površina podgradne konstrukcije

(gornji svod + oporci + temelji + podnožni svod + ispuna)

$F_S$  – površina svijetlog profila



*Sl. 1.1. Elementi poprečnog presjeka podzemnog objekta*

Svijetli profil mora biti takvog oblika i dimenzija da obezbjedi slobodan profil za projektovani standardni gabarit vozila kod saobraćajnih tunela ili nesmetano smještanje opreme i obavljanje drugih funkcionalnih potreba u podzemnom objektu u zavisnosti od vrste podzemnog objekta i njegove namjene.

### **1.3.1. Načela za određivanje položaja i poprečnog presjeka tunela**

#### **Određivanje položaja tunela**

Na definisanje položaja tunela u "prepreci" koju treba savladati utiče veliki broj faktora. Najznačajniji su: geološki, hidrogeološki, klimatski i ekonomski.

Geološki uslovi, uslovi izrade i eksploatacije tunela zavise u mnogome od geološkog sastava terena, strukturnih osobina masiva, hidroloških uslova i stepena raspadnutosti stijena kroz koje treba izgraditi tunel. Od većine ovih činilaca zavisi i veličina podzemnog pritiska, pa samim tim i stabilnost prostorije u toku izrade i kasnije u toku eksploatacije.

Pored litološkog sastava stijenskog masiva u kojem se grade podzemne prostorije, nosioci većeg broja poteškoća kod izrade i kasnije eksploatacije tunela vezani su za oštećenje stijenske mase, koje mogu biti mehaničke ili hemijske prirode. Od obima i karaktera ovih oštećenja zavisi težina izrade tunela i kasnije troškovi vezani za održavanje i eksploataciju.

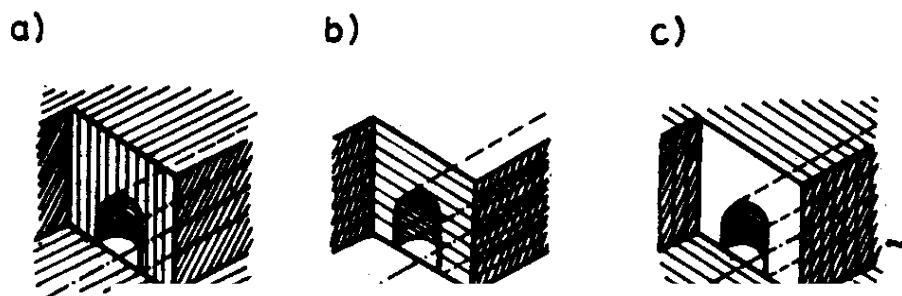
Kod izgradnje tunela od posebnog značaja su mehanička oštećenja stijenske mase, koja se manifestuju u obliku mreže pukotina ili značajno usitnjenog materijala. Obično zone ovakvih

mehaničkih oštećenja predstavljaju i puteve kojima se kreće podzemna voda, koja ukoliko se javlja u većim količinama može da stvori velike teškoće pri izgradnji tunela.

Uporedo sa mehaničkim oštećenjem stijenske mase prisutna je i pojava hemijskog oštećenja, koje se javlja u vidu izmjena u stijeni izazvanih hemijskim djelovanjem vode, gasova i temperature. Ova pojava obično prati mehanički najviše oštećen dio stijenskog masiva, kao što su rasjedne zone, ubrani djelovi stijenske mase i dio masiva neposredno na površini terena.

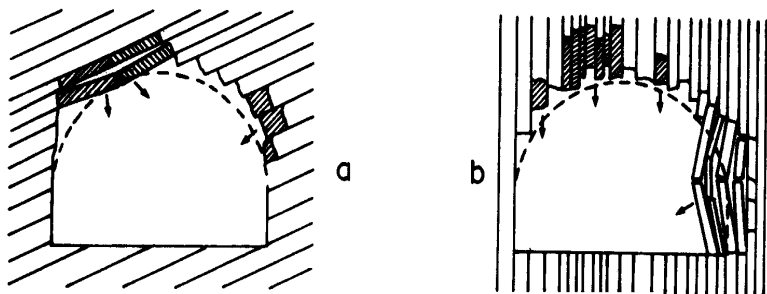
S obzirom da oštećeni dijelovi stijenske mase, zajedno sa nepovoljnim položajem slojeva (banaka) u odnosu na trasu tunela i stijena sa lošim mehaničkim karakteristikama, predstavljaju nepovoljne uslove za tunel kao objekat, to proizilazi da tunele treba locirati u zdravoj i kompaktnoj stijeni. Međutim, ovom uslovu vrlo često nije moguće udovoljiti. Na osnovu mnogobrojnih primjera iz prakse moguće je izdvojiti više slučajeva u kojima je položaj tunela nepovoljan i koje treba izbjegavati.

Tako na primer, kod slojevitih stijena i stijena sa jasno izraženom bankovitošću i škriljavošću, iz odnosa položaja ose tunela i položaja slojeva, banaka ili ravni škriljavosti mogu da nastanu tri različita slučaja (vidi *sl. 1.2*).



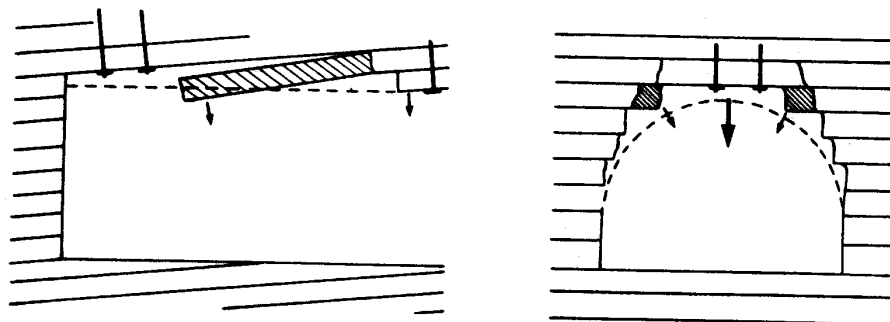
*Sl. 1.2. Šema položaja slojeva (banaka) u odnosu na osu tunela*

Sa stanovišta povoljnosti odnosa slojeva i ose tunela, odnosno pravca izrade, najnepovoljniji je slučaj prikazan na slici *1.2.a*, kada su ravni slojevitosti, bankovitosti ili škriljavosti paralelne osi tunela, a slojevi padaju vertikalno ili pod nekim strmim uglom. U slučaju da ne postoje veze između slojeva ili banaka, tada slojevi cijelom svojom težinom opterećuju krovinski dio tunela (*sl. 1.3.b*), što u podgradi izaziva veoma visoke i neravnomjerne pritiske. Nešto povoljniji je slučaj prikazan na *sl. 1.3.a*.



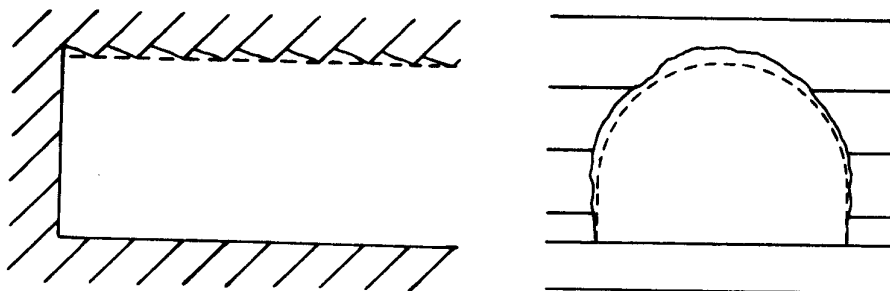
*Sl. 1.3. Pravac tunel se poklapa sa ravni slojevitosti*

Ukoliko se slojevi (banci ili pukotine) horizontalni ili skoro horizontalni (*sl. 1.2.b* i *sl. 1.4.*), tada se smatra da je ovo nešto povoljniji slučaj u odnosu na prethodni, jer postoje svi preduslovi da ukoliko dođe do razaranja stijenskog materijala prvo dođe do razaranja u krovini, što uslovljava pojavu uvećanog svoda prirodne ravnoteže. Međutim, ukoliko slojevi nisu oštećeni pukotinama i raspolažu određenom mehaničkom čvrstoćom i stabilnošću, tada pogodnim sistemom izrade tunela i podgrađivanja naprijed navedena nepodobnost se može izbjeći.



*Sl. 1.4. Horizontalno pružanje slojeva*

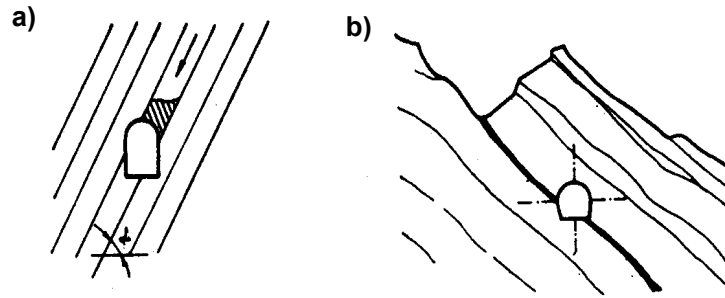
Kada su slojevi vertikalni ili skoro vertikalni, a ravni slojevitosti (bankovitosti ili škriljavosti) upravne ili pod nekim uglom u odnosu na osu tunela (*sl. 1.2.c* i *sl. 1.5.*), to predstavlja povoljnu geološku situaciju. U ovom slučaju podzemni pritisak se ravnomerno raspoređuje po cijelom obimu tunela, a stijenska masa se ponaša kao da se tunel gradi u masivnoj stijeni.



*Sl. 1.5. Vertikalni slojevi (banci)*

Svakako da osim ova tri ekstremna slučaja u prirodnoj stijenskoj sredini postoje još i mnogi drugi, a koji se po položaju slojeva u odnosu na osovinu tunela nalaze između ova tri osnova slučaja.

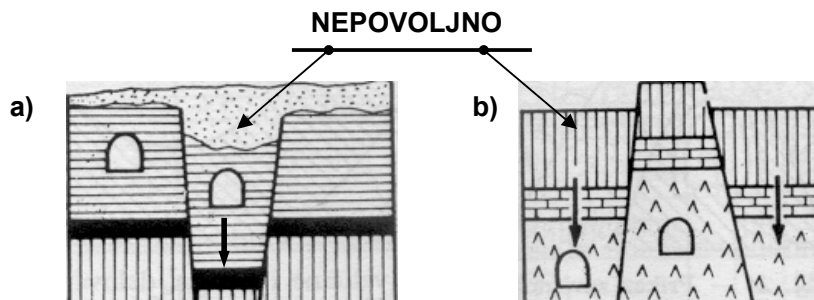
Rasjedne zone predstavljaju posebnu opasnost, jer duž rasjednih linija postoji mogućnost da pojedini blokovi ili veća masa sklizne i ugrozi radove ili već izgrađen objekat (*sl. 1.6.a*). Osim toga, duž tektonskih pukotina obično cirkulišu i veće količine podzemne vode (*sl. 1.6.b*). Naravno da ovakve zone treba izbjegavati i tunel locirati van rasjeda ili rasjednih zona. Rasjed i rasjedne zone nije moguće u potpunosti izbjeći, ali treba težiti da je osovina tunela što više upravna na rasjed ili rasjednu zonu. Ovim se postiže da je dužina tunela koja prolazi kroz rasjed minimizirana.



**Sl. 1.6.** a) Jednostrano opterećenje podgrade;  
b) Položaj tunela u odnosu na rasjed

Tektonski rovovi takođe predstavljaju nepovoljna mesta za lociranje podzemnih prostorija. Tako se, na primer, spuštenu dio stijenske mase u tektonskom rovu odlikuje veoma visokim podzemnim pritiskom i znatnim dotokom podzemne vode (sl. 1.7.a), što sve otežava i poskupljuje izradu tunela. Međutim, podzemni pritisak u bočnim krilima ovog rova je niži i ovi dijelovi predstavljaju znatno povoljniju radnu sredinu, mada postoji mogućnost da i u krilima dođe do znatnog pritoka vode i gasa.

Sasvim drugačiju sliku imamo u slučaju tektonskog grebena, kod koga nepovoljniji dio stijenskog masiva predstavljaju krila, u kojima zbog kretanja i ukleštenja dolazi do znatno većih pritisaka i promjena (sl. 1.7.b).

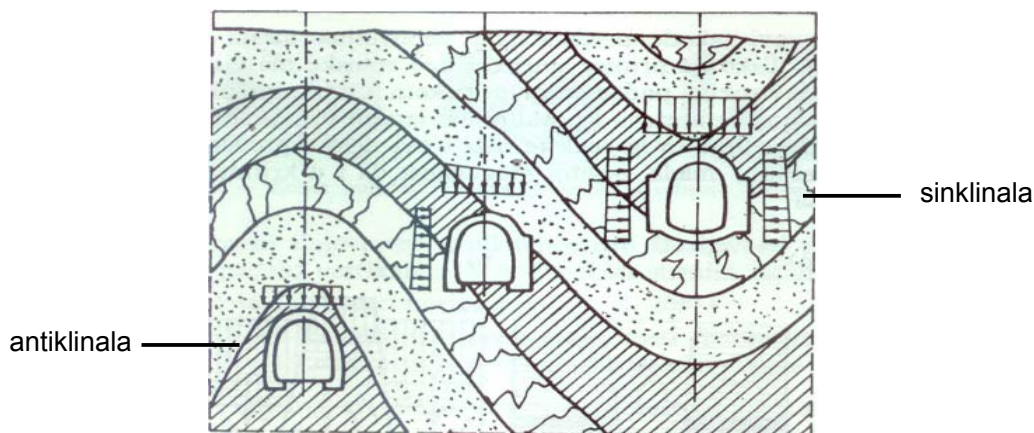


**Sl. 1.7.** Šema lokacije tunela u: a) tektonskom rovu;  
b) tektonskom grebenu

Kao pravilo, koje kako se to pokazalo ima i izuzetaka (slučaj Sen-Gothardskog tunela), može se reći da dijelovi stijenskog masiva koji su tektonikom poremećeni i spuštenu ne predstavljaju pogodnu radnu sredinu i treba ih izbjegavati.

Dijelovi stijenskog masiva koji su usljed velikih poremećaja bili izloženi veoma visokim naprezanjima i raspolažu sa velikom količinom akumulirane energije, predstavljaju nepovoljne sredine, jer usljed neuravnoteženog unutrašnjeg naponskog stanja dolazi do kretanja materijala u pravcu izrađene podzemne prostorije i pojave velikih pritisaka. U ovakvim uslovima nije rijetkost ni pojava podzemnog udara.

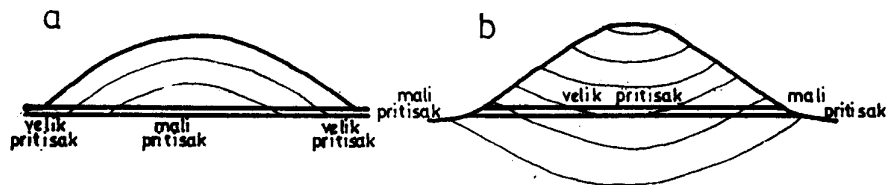
Kod izrade mnogih tunela pokazalo se da dolazi do teškoća i kada se tuneli izrađuju u antiklinalnim dijelovima stijenskog masiva. U slučaju da se osa tunela poklapa sa osom nerazorene antiklinale, pritisak na podgradu tunela biće minimalan zahvaljujući položaju slojeva koji štite objekat jednim svodom prirodne ravnoteže, jer ovaj na sebe prima spoljašnje opterećenje (sl. 1.8, lijevo). Međutim, sasvim je drugačiji slučaj ako se tunel locira u jednom od krila antiklinale, gdje pored velikog vertikalnog pritiska, podgrada tunela mora da se suprotstavi i pojačanom nesimetričnom bočnom opterećenju (sl. 1.8. u sredini).



**Sl. 1.8.** Položaj tunela u odnosu na antiklinalu i sinklinalu i zavisnost veličine i pravca podzemnih pritiska

Posebno nepovoljan slučaj nastaje ako se tunel radi po osi sinklinale (sl. 1.8. desno), gdje veličine vertikalnih i bočnih pritisaka mogu dostići veoma velike vrijednosti. U ovoj zoni se takođe očekuje i veliki priliv podzemne vode.

Na slici 1.8. se vidi uticaj veličine podzemnog pritiska na podgradnu konstrukciju ako se tunel izrađuje u pravcu pružanja antiklinale, odnosno sinklinale. Međutim, nije neinteresantno analizirati ni slučaj kada je osa tunela upravna na antiklinalu, odnosno sinklinalu, što je šematski prikazano na slici 1.9, sa koje se mogu pratiti promjene pritiska u zavisnosti od položaja slojeva.



**Sl. 1.9.** Pritisci duž tunela koji je postavljen upravno na osu pružanja:  
a) antiklinale; b) sinklinale

Neprijatnosti, kako kod izrade, a posebno kod eksploatacije tunela, mogu izazvati i sekundarni procesi raspadanja stijena izazvani intenzivnijim kretanjem vode, koje je prouzrokovala izradena podzemna šupljina (u ovom slučaju tunel). Ovakve stijene trebalo bi izbjegavati, jer vremenom, sa povećanjem stepena raspadanja, obično dolazi do povećanja podzemnog pritiska, prskanja podgradne konstrukcije i obrušavanja. Ovakve stijene su obično ispresjecane veoma gustom

mrežom pukotina, pa i u toku same izrade se javljaju teškoće ne samo u vezi održavanja već i kod bušenja i miniranja (bušaće dleto se zaglavljuje, bušotina se krivi i veoma brzo zatvara, što onemogućava punjenje bušotine eksplozivom itd).

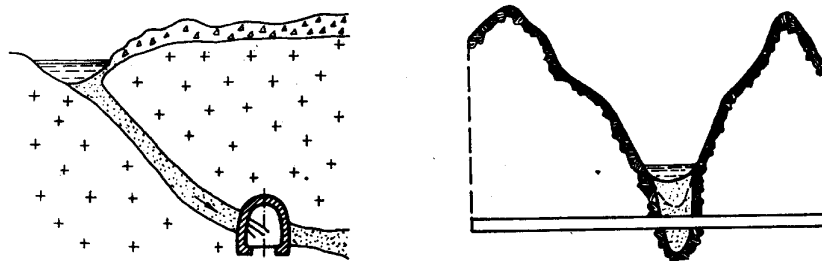
### Hidrogeološki uslovi

Teškoće kod izrade tunela ne nastaju samo kada se tunel radi u heterogenom stijenskom materijalu i u složenim geološkim i tektonskim uslovima, već mogu da nastanu i kod rada u homogenim i geološki mirnim sredinama. Tipični primjeri su radovi u glini i sredinama bogatim vodom. Kako je svaka podzemna prostorija, pa i tunel, istovremeno i drenažna, to okolna voda sa višeg nivoa (ukoliko tunel nije pod hidrostatičkim pritiskom) gravitira ka izrađenoj šupijini. Priliv vode u tunel zavisi od veličine poprečnog presjeka tunela i njegove dužine, zatim koeficijenta filtracije i količine vode u stijeni.

Kod izgradnje podzemnih objekata najveći značaj imaju vode regionalnog i lokalnog rasprostiranja, koje se obično nalaze unutar stijenske mase u vidu vodonosnih horizonata ili podzemnih akumulacija. Ali nisu bez značaja ni površinske vode, koje veoma često dubokim pukotinama ili duž rasjeda mogu da prodru duboko u stijenski masiv.

Najveću opasnost kod izrade tunela predstavljaju vode pukotinsko-žičnog tipa u zonama tektonskih poremećaja, koje obično obiluju velikim količinama vode i velikom izdašnošću, što može da bude katastrofalno za podzemni objekat u izgradnji. Nisu rijetki slučajevi da kada se presječe jedna ovakva zona gradilište bude poplavljeno i dalji rad na izradi onemogućen (kod nas su poznati slučajevi prodora vode pri građenju tunela "Lokve" na putu Berane – Rožaje, dužine 1116m, tunela "Vrmac" na putu Tivat – Kotor, dužine 1640m, hidrotehnički tunel "Sozina" i dr.).

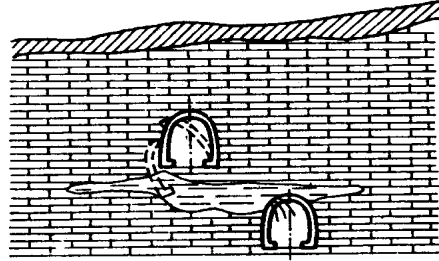
Prilikom izgradnje tunela naročito su opasni nagli prodori vode i mulja, koji onemogućavaju dalji rad i za sanaciju, pored velikih materijalnih izdataka, traže i znatno vrijeme. Na slici 1.10.a prikazan je slučaj kada je tunel presjekao vodonosni sloj koji ima direktnu vezu sa jezerom na površini, a na slici 1.10.b slučaj kada tunel prosjeca zapunjeno korito rijeke. Obično su u ovakvim slučajevima dalji radovi onemogućeni i u tom pravcu se moraju obustaviti.



**Sl.1.10.** Nepovoljna – opasna situacija u kojoj tunel presjeca: a) vodonosni sloj koji ima vezu sa jezerom na površini; b) zapunjeno rječno korito



U karsnim terenima, koji obiluju velikim karsnim šupljinama ispunjenim vodom, teškoće mogu biti vezane za nagle izlive vode ili oštećenje dijelova podgradne konstrukcije ili čitavih dionica, što sve zavisi od položaja tunela u odnosu na podzemno jezero ili akumulaciju (sl.1.11). U ovakvim slučajevima, najčešće se radovi mogu nastaviti po isticanju vode iz podzemne akumulacije. Kod nas je poznato da je pri iskopu vodo-istražnog tunela “Mojdež” u blizini Herceg Novog (površine poprečnog profila oko 5m<sup>2</sup>) pri prelasku iz flišne – vodonepropusne sredine u zonu krečnjaka došlo do naglog izlivanja vode koja je u punom profilu tunela isticala neprekidno 7 dana.



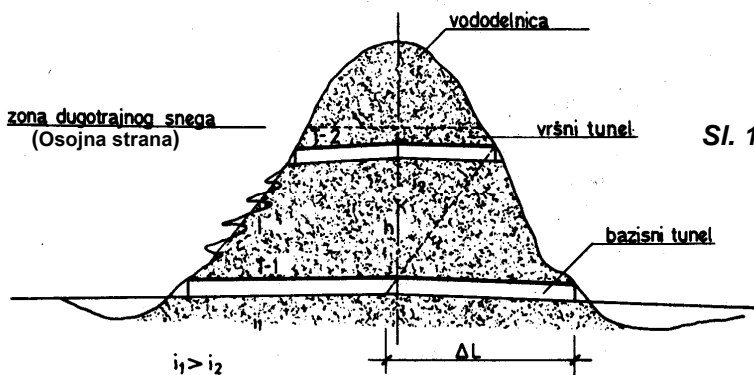
Sl. 1.11. Opasan položaj tunela u karstu

Na posebne teškoće se nailazi kod izrade tunela u glini, glinovitim pijeskovima i sličnim stijenama, a koje su sklone bubrenju. Kod ovakvih stijena, usled osobine bubrenja, podzemni pritisak ne samo da je velik iz krova već i iz bokova i poda, i vremenom se još i povećava. U takvim slučajevima podgradna konstrukcija mora biti veoma snažna i vodonepropusna. Kod nas je ova pojava bila naročito izražena na pojedinim dionicama hidrotehničkog tunela “Sozina”, pri čemu je, na pojedinim dionicama, usljed bubrenja konstrukcija inverta skoro dotakla kalotu.

Podzemne vode nemaju samo uticaj na ponašanje stijenskog materijala u toku izgradnje, kako smo to vidjeli iz navedenih primjera, već imaju značaja i za tunel u toku eksploatacije. Primjera radi, navodi se samo razorno dejstvo agresivnih voda na betonsku i čeličnu podgradnu konstrukciju.

### Klimatski i ekonomski uslovi

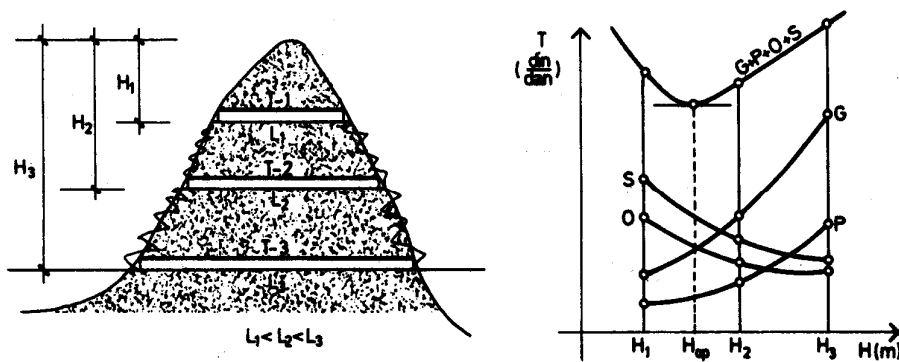
Prilikom potrebe prelaza preko vododelnice, građenjem tunela ispod nje skraćuje se trasa saobraćajnice i ublažavaju usponi, a samim tim smanjuju se troškovi eksploatacije i održavanja. U ovom slučaju tunel se može postaviti bliže vrhu vododelnice i tada se naziva vršni tunel, za razliku kada trasa prolazi iz jedne doline u drugu pri dnu planinskog ili brdskog masiva (bez razvijanja trase po padini) kada se takav tunel naziva bazišni tunel (sl. 12).



Sl. 1.12. Uticaj klimatskih uslova na visinski položaj tunela

Pored ekonomskih parametara često se kao opredjeljujući faktor za odlučivanje o visinskom položaju tunela pojavljuju klimatski uslovi, prvenstveno zona dugotrajnog zadržavanja snijega i leda na osojnim (neosunčanim) stranama brda ili planine.

Ekonomska analiza u kojoj se troškovi građenja i eksploatacije jednog tunela i pripadajuće saobraćajnice upoređuju sa troškovima građenja i eksploatacije za drugi tunel i pripadajuću saobraćajnicu daje najpovoljnije rešenje. Naime cijena građenje tunela po jedinici dužine je veće od cijene građenja puta po jedinici dužine, pa se optimalni položaj tunela nalazi iz uslova minimuma cijene izrade ukupne dionice. Takođe je potrebno odrediti i najpovoljniji položaj tunela za dato saobraćajno opterećenje. Određivanje najpovoljnijeg položaja tunela s obzirom na visinu ( $H_i$ ) vrši se na osnovu troškova građenja ( $G$ ), troškova pogona ( $P$ ), troškova održavanja ( $O$ ) i troškova saobraćaja ( $S$ ).



Sl. 1.13. Određivanje najpovoljnijeg položaja tunela

Za različite položaje tunela sa utvrđenim saobraćajnim opterećenjem određuju se ukupni troškovi predstavljeni sumarnom linijom  $G + P + O + S$ . Horizontalna tangenta povučena na ekstremni položaj sumarne krive, daje optimalnu visinu  $H_{opt}$  za izbor položaja tunela (sl. 1.13).

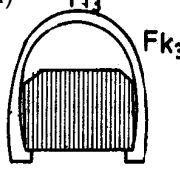
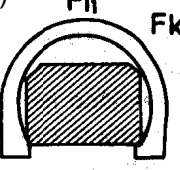
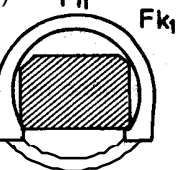
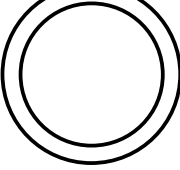
### 1.3.2. Definisanje poprečnog presjeka tunela

Poprečni presjek tunela ili podzemnog objekta se definiše gabaritom (dimenzijama) i oblikom.

Gabariti (dimenzije) poprečnog presjeka prvenstveno zavise od namjene objekta (potrebna, neto, korisna površina poprečnog presjeka). Kod saobraćajnih tunela neto dimenzije (svijetli otvor) definiše saobraćajni profil i potrebni prostor za smještaj prateće opreme za ventilaciju, osvjjetljenje, saobraćajnu signalizaciju i sl. Kod podzemnih objekata drugih namjena svijetli profil podzemnog objekta definiše potrebni prostor za smještanje opreme, pristup opremi, zahtjevani kapaciteti skladišnih prostora, prostor za manipulaciju, prostor za pristup patećim instalacijama i drugo.

Oblik podgradne konstrukcije projektuje se prema karakteru i veličini spoljašnjeg opterećenja i veličine potrebnog slobodnog profila, tj. pritisku stijenske mase koji djeluje na podgradnu konstrukciju. Nakon definisanja oblika konstrukcije usvajaju se dimenzije pojedinih elemenata (prvenstveno debljina obloge) na osnovu iskustva ili na osnovu približnih obrazaca. U tabeli 1.1. su prikazani karakteristični oblici tunelske konstrukcije u funkciji pritiska tj. opterećenja. Za usvojeni oblik i dimenzije podgradne konstrukcije vrši se provjera stanja napona i deformacija tj. statički proračun i dimenzionisanje, koji iterativnim postupkom dovode do najpovoljnijeg oblika podgradne konstrukcije.

**Tabela 1.1.** Karakteristični oblici tunelske konstrukcije u funkciji pritiska tj. opterećenja

I SNAŽNO VERTIKALNO OPTEREĆENJE	II SNAŽNO VERTIKALNO I SNAŽNO HORIZONTALNO - BOČNO OPTEREĆENJE	III II + SNAŽAN PRITISKA IZ PODA	IV SNAŽAN SVESTRANI PRITISAK
a) 	b) 	c) 	d) 

Analiza i razionalizacija oblika tunelske konstrukcije se vrši u cilju minimizacije cijene koštanja, pojednostavljenja radova i skraćenja vremena građenja. Najvažniji i najopterećeniji dio tunelske konstrukcije obično je svod. Ekstremni naponi u bilo kom presjeku svoda mogu se sračunati na osnovu izraza:

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{W}$$

gdje su:

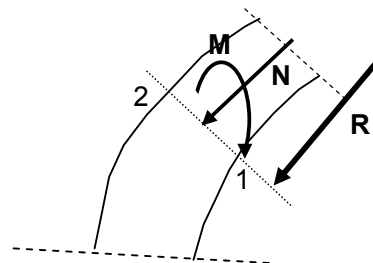
$N$  - normalna sila

$M$  - moment savijanja

$F$  - površina porečnog presjeka

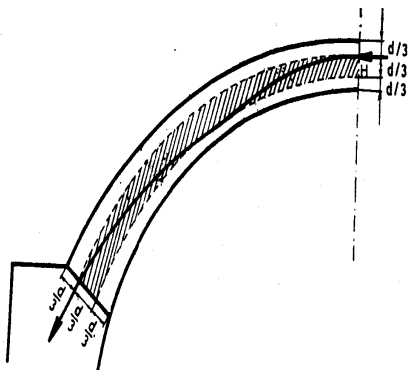
$W$  - otporni moment presjeka

$\sigma_{1,2}$  - ivični naponi u betonu podgradne konstrukcije



Optimalno stanje napona će biti onda kada je moment savijanja jednak nuli tj. kada rezultanta unutrašnjih sila prolazi kroz težište presjeka. Ako je ovaj uslov zadovoljen u svim presjecima svoda postignut je najracionalniji oblik svoda. Prema tome izbor racionalnog oblika svoda se svodi na

iznalaženje takvog oblika svoda kod kog su momenti savijanja u svim presjecima jednaki nuli ili imaju zanemarivu vrijednost.



**Sl. 1.14.** *Povoljan položaj rezultante duž konstrukcije tunela*

Kod tunela i drugih podzemnih konstrukcija opterećenje na konstrukciju se vrlo brzo mijenja duž same konstrukcije pa je definisanje racionalnog oblika svoda u velikoj mjeri povezano i sa drugim uslovima i uticajnim faktorima, kao što su tehnologija iskopa, oplata i sl. Zbog toga se može konstatovati da je oblik svoda dobro odabran ako se linija pritiska nalazi u srednjoj trećini poprečnog presjeka tj. ako rezultanta unutrašnjih sila leži unutar jezgra presjeka (sl. 1.14). Izabrani unutrašnji oblik tunelske konstrukcije se praktično ne mijenja duž trase tunela, a po potrebi mijenja se samo debljina obloge tj. konstrukcije.

Najpovoljniji oblik tunelske konstrukcije najčešće se ne može uskladiti sa namjenski najpovoljnijim profilom, pa se gotovo nikad ne može postići potpuna iskorišćenost svijetlog profila (tabela 1.1). Zbog toga je nerijetko potrebo izvršiti ekonomsku analizu oblika poprečnog presjeka tunelske podgradne konstrukcije koja može pokazati da najpovoljniji statički oblik (koji daje najmanju debljinu obloge, tabela 1.1.a) ne mora biti i najekonomičniji, već nešto nepovoljniji oblik veće debljine obloge (tabela 1.1.b) ili uz primjenu armirano betonske obloge.

#### **1.4. Dreniranje i hidroizolacija tunela pri izgradnji i u eksploataciji**

##### **Dreniranje pri izgradnji**

Voda u tunelu je redovna pojava. Priliv vode u tunel, kao drenažu, zavisi od visine vodenog stuba, vrste stijena, ispucalosti itd. Kontrolisano izvođenje vode iz tunela je neophodno jer voda:

- otežava rad osoblju,
- može oštetiti instalacije i mašine,
- može uticati na slabljenje mehaničkih karakteristika stijene
- u slučaju kontra pada može potopiti tunel

Voda se iz tunela može odvesti na dva načina: gravitacionim tokom (obično se vrši iskop kanala po sredini tunela do portala ili prirodnog recepijenta - kaverne) i cjevovodima uz pomoć pumpi. Minimalni podužni pad kanala potreban za odvodnjavanje tunela pri izgradnji je oko 2‰. Kod tunela koji se izvode u kontra padu, pa voda ne može da otiče prirodnim putem, koriste se pumpe koju vodu crpe iz mjestimično iskopanih sabirnih jama.

Poseban problem dreniranja javlja se pri izgradnji tunela ispod rijeka (obično u gradovima pri izgradnji metroa). U tim slučajevima se koristi sistem više pumpi koje se uključuju u rad u

zavisnosti od nivoa vode u sabirnim jamama. Sličan sistem za dreniranje se kasnije koristi i pri eksploataciji tunela.

### **Dreniranje i hidroizolacija pri eksploataciji tunela**

U zadnjih dvadesetak godina kriterijumi za hidroizolaciju tunela i različitih podzemnih objekata su naglo "porasli". Kod saobraćajnih tunela povećana računaska brzina i povećana dužina tunela (koja je dovela do primjene različitih električnih i drugih instalacija u tunelima) su usloveli strožije uslove koje mora da ispuni hidroizolacija. Kod objekata specijalne namjene, kao što su podzemna skladišta radioaktivnog otpada tehnološki uslovi diktiraju vrlo stroge kriterijume u pogledu hidroizolacije. Položaj hidroizolacionog sloja (ili slojeva) značajno je uslovljen tehnologijom izgradnje tunelske podgradne konstrukcije, kao i od toga da li se hidroizolacija postavlja u toku izgradnje ili kao mjera sanacije izgrađenih tunela.

Kod savremenog pristupa izgradnje (Nova Austrijska Tunelska Metoda, NATM) nakon iskopa i izvođenja primarne podgrade od torkreta (mlaznog betona<sup>2</sup>), kojom se postiže privremena ili trajna stabilnosti konture iskopa, postavlja se hidroizolaciona folija, a nakon toga se izvodi sekundarna obloga od livenog betona koja pridržava hidroizolaciju i štiti od mehaničkih oštećenja (dvoslojna obloga). Ukoliko je površina torkreta primarne obloge neravana prije postavljanja hidroizolacije se nanosi izravnavajući sloj od torkreta sitnije granulacije agergata (obično  $d_{MAX} = 8\text{mm}$ ).

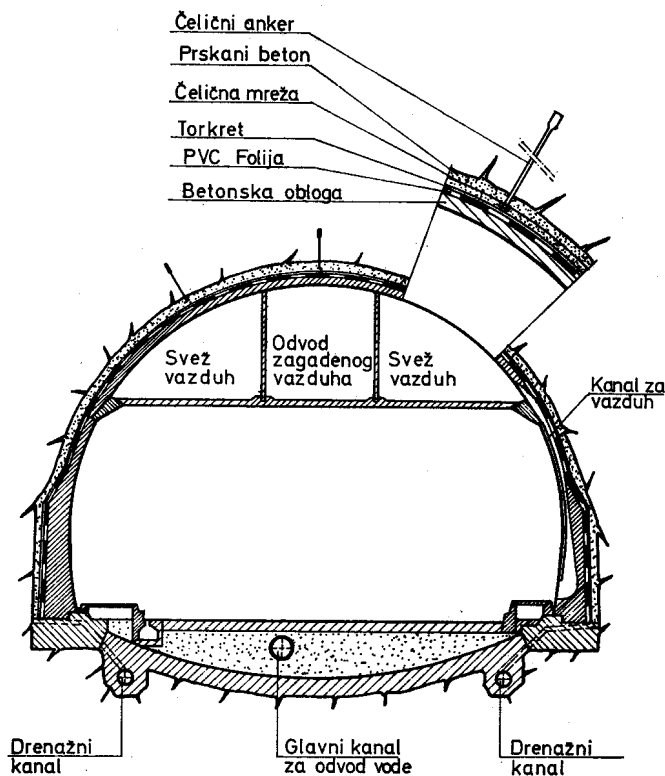
Hidroizolaciona membrana se postavlja na sloj geotekstila (filc) debljine 3-8mm (rijetko izvan ovih granica, težine 300 do 600 g/m<sup>2</sup>) koji štiti membranu od oštećenja pri postavljanju, drenira membranom zaustavljenu vodu i sprovodi je do perforiranih drenžnih cijevi postavljenih u visini kolovoza sa obje strane tunelske cijevi (sl. 1.15).

Kada se očekuje veći dotok vode membrana se postavlja na talasastu vodopropusnu podlogu debljine 10-12mm koja vertikalnim kanalima (formiranim "talasima") odvodi vodu do perforiranih drenažnih cijevi. Do prije desetak godina obično su korišćene PVC vodonepropusne mebrane, debljine 2-3mm. Danas se sve više koriste membrane-folije od polietilena visoke gustine (*high density polietilen*) debljine 0.8 do 1.5mm (2.0mm, ređe deblje) koje su manje štetne po okolinu i otpornije su na efekte starenja materijala. Poprečni spojevi ovih membrana izvode se dvostrukim paralelnim zavarivanjem, tako da je svaki spoj moguće testirati, obično komprimovanim vazduhom ili pumpanjem vode u kanal između dva vara (pritisak testiranja 6.0atm). Membrane se sa jedne strane obično proizvode svijetle (bije) boje kao bi se obezbjedila pogodna refleksiona podloga za osvjetljenje i lakše uočila oštećenja na membrani.

---

<sup>2</sup> U našoj tehničkoj regulativi se koristi izraz "mlazni beton", kao sinonimi se mogu koristiti izrazi prskani beton ili torkret.

Kod savremenih tunela, zbog ekoloških razloga, drenažni sistem se sastoji od sistema koji prikuplja čistu vodu iz stijene (iza hidroizolacije) i odvojenog sistema za dreniranje - odvođenja vode sa kolovoza koja je u većoj ili manjoj mjeri zagađena (uljem, pogonskim gorivom i dr). Voda iz drenažnog sistema oko obloge se obično sakuplja poprečnim vezama u odvodnu cijev koja je locirana po sredini tunela ispod kolovoza (kako je prikazano na slikama 1.21 i 1.22. na str. 27.), koju je moguće bez prečišćavanja odvesti u prirodni recepijent. Sistem za odvođenje vode sa kolovoza se obično locira sa jedne ili obje strane kolovoza (zavisno od poprečnog nagiba kolovoza) i odvodi vodu do sistema za tretman otpadnih voda a nakon toga se odvodi u prirodni recepijent.



SI.1.15. Podgradna konstrukcija sa položajem hidroizolacije i glavnim odvodnim kanalom

### Hidroizolacija kod sanacionih radova

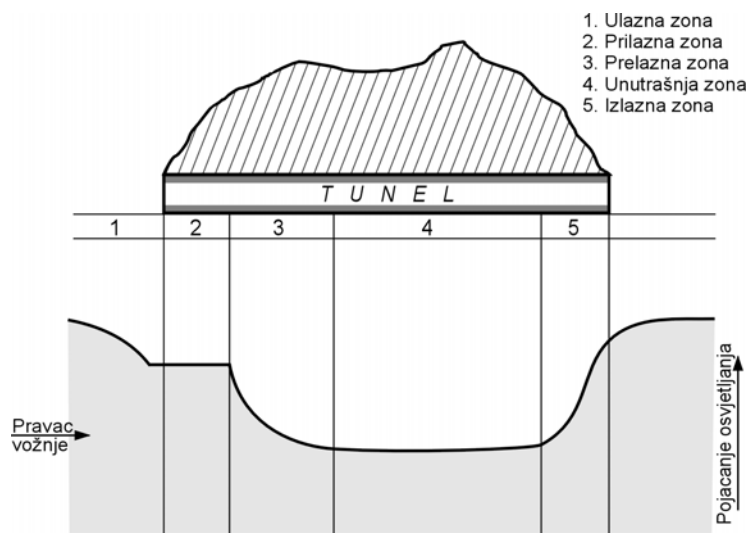
Kada je hidroizolacija dio sanacionih radova na tunelima, ona se postavlja na unutrašnju površinu obloge tunela. Zaštita mebrane, od mehaničkih oštećenja i dejstva otvorene vatre u slučaju požara, u ovim situacijama najčešće se vrši slojem torkreta. Debljina torkreta je limitirana slobodnim profilom u tunelu i kapacitetom ankera (primjenjenih za fiksiranje mebrane) za prijem sopstvene težine torkreta. Kod saobraćajnih tunela na većoj nadmorskoj visini pri dimenzionisanju zaštitnog sloja od torkreta treba voditi računa o mogućem zamrzavanju vode iza mebrane. Kod sanacionih radova za zaptivanje pojedinačnih pukotina i prslina moguće je koristiti i različite vrste zaptivnih smola i kitova ili ekspazivnih smjesa.

## 1.5. Prateći sistemi saobraćajnih tunela

Prateći sistemi (sadržaji) saobraćajnih tunela su: osvjjetljenje, ventilacija, energetska postrojenja, protipožarna zaštita (sistem za detekciju požara, protipožarna spremišta, hidranti, telefoni i automatska dojava požara), video nadzor itd.

### 1.5.1. Osvjetljenje

Vještačko osvjjetljenje u putnim tunelima obezbjeđuje da vozač u tunelu dobro vidi put i da se brzo uoče potencijalno opasne situacije u tunelu, takođe, i da se smanji osjećaj klaustrofobije tj. straha od suženog prostora. U ovom poglavlju se navode osnovne informacije i tehnički kriterijumi koji utiču na projektovanje, održavanje i aspekt odlučivanja vezane za osvjjetljenje tunela na putevima. Navode se osnovna moguća tehnička rješenja lokacije svjetiljki, izbor vrste svjetiljki, režima održavanja i čišćenja, kao uticaj vrste kolovoza i finalizacije zidova tunela.



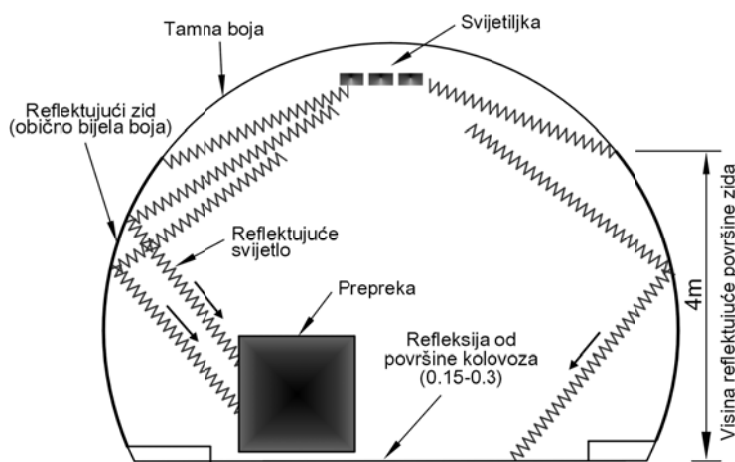
**Sl. 1.16.** Zone osvjjetljenja tunela

U pogledu osvjjetljenja, tunele karakteriše pet zona: prilazna, ulazna, prelazna, unutrašnja i izlazna zona (sl. 1.16). Ulazna zona je prvi dio tunela koji vozač vidi iz prilazne zone tunela. Prelaznu zonu karakteriše postepena redukcija vještačke osvjjetljenosti na intenzitet osvjjetljenosti u unutrašnjoj zoni tunela. U izlaznoj zoni tunela osvjjetljenje se povećava u cilju readaptiranja oka vozača na dnevnu svjetlost. Dužina ulazne i prelazne zone i izlazne zone su direktno proporcionalne brzini kojom se vozilo kreće, tj. vremenu koje je neophodno da se oko vozača sigurno adaptira na nivo vještačkog osvjjetljenja u tunelu. Generalno, potrebna dužina izlazne zone je kraća jer se oko brže adaptira sa prelaza mraka na svijetlost u odnosu na promjenu svjetlost – mrak. Proračun ovih zona direktno zavisi od zaustavne dužine za usvojenu računsku brzinu.

Imajuću u vidu adaptaciju oka kod tunela na otvorenom putu (daleko od drugih vještačkih izvora svjetlosti), osvjjetljenost se povećava na maksimuma u toku dana i redukuje do minimuma u toku

noći. Najpoželjnija je automatska regulacija osvijetljenosti tunela u zavisnosti od uslova van tunela koja omogućuje i minimiziranje utroška energije za osvijetljavanje tunela.

Važni faktori za kvalitet osvijetljenja u tunelu su položaj i usmjerenost svjetiljki, popečni presjek, prilazni uslovi tunelu, računaska brzina, obrada zidova konstrukcije tunela, boja kolovoza. Svjetiljke se obično postavljaju poređane u redu paralelno sa osom tunela (sl. 1.17), na pravilnom rastojanju koje se ponavlja od kraja do kraja tunela. Kada su svjetiljke postavljene centralno u svodu tunela u ulaznoj i prelaznoj zoni se obično postavljaju dodatni redovi svjetiljki radi povećanja osvijetljenosti. Svjetlost pojedinih svjetiljki je predominantno usmjerena transversalno u odnosu na osu tunela što daje podužno simetričnu raspodjelu osvijetljenja. Bočno postavljene svjetiljke imaju prednost kod održavanja i čišćenja, ali je teže obezbjediti ravnomjerno osvijetljenje kada je kod manjih tunela potreban samo jedan red svjetiljki. Longitudinalno kontra svjetlo direktno usmjereno ka vozaču nije preporučljivo iz bezbjedonosnih razloga.



**Sl. 1.17.** Centralni položaj svjetiljki i refleksija od zidova i kolovoza

Površina zidova i kolovoza u tunelu mogu imati visoku reflektujuću difuznu svjetlost, pa imaju vodeću ulogu u uštedi energije za osvijetljenje. Zbog toga može biti opravdano promijeniti originalni projekat kolovozne konstrukcije od asfalta koji ima reflektujuću vrijednost 0.15 sa ravnim betonskim kolovozom koji ima reflektujuću vrijednost 0.3. Izbor površine zidova tunela može zavisiti direktno od građevinskih razloga. Kod tunela sa sekundarnom oblogom refleksija ne treba da bude manja od 0.6, što treba obezbjediti obradom - bojenjem obloge do 4.0m visine kako je prikazano na sl. 1.17.

### 1.5.2. Ventilacija tunela - provjetranje

Posmatrajući tunele istorijski, ventilacija postaje problem u tunelima u zadnjih 100 godina sa povećanjem korišćenja vozila sa motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem, bilo da se radi o putnim



tunelima ili tunelima na željeznici. U uslovima povećanog zagađenja prirodna ventilacija nije dovoljna i vještačka ventilacija tunela treba da obezbjedi dovoljno čist vazduh za nesmetano disanje, ali i da odvede dim kako bi se obezbjedila dobra vidljivost u tunelu. Razvoj brzog podzemnog transporta u gradovima, metroi, zahtjeva pored ovoga i odvođenje zagrijanog vazduha koji se produkuje hlađenjem lokomotiva i boravkom velikog broja ljudi u stanicama.

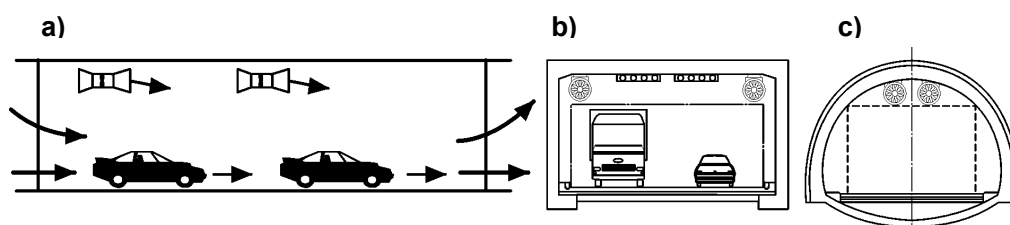
Pri radu motora na unutrašnje sagorijevanje (bilo da se radi o benzinskim ili dizel motorima) oslobađa se ugljen monoksid (CO) kao glavni štetni sastojak po disanje ljudi, pored toga i ugljen dioksid, sumpor dioksid i oksidi azota. Prema našem važećem pravilniku za putne tunele koncentracija ugljen monoksida ograničena je za tunele kraće od 1000m do 250ppm, a za tunele duže od 2000m do 200ppm (gde je sa ppm označena zapremska koncentracija štetnog gasa u vazduhu, izražena u  $\text{cm}^3/\text{m}^3$ ). Međutim, preporuke u razvijenim zemljama propisuju značajno manje koncentracije navedenih gasova, tako da to uskoro treba očekivati u našoj zemlji.

Štetni gasovi se iz tunela odstranjuju prirodnim ili vještačkim provjetranjem. Efikasnost prirodnog provjetranja zavisi od intenziteta saobraćaja, položaja u brdskom masivu i atmosferskih uslova tj. orijentacije u odnosu na pravac glavnih vjetrova, razlike pritiska na portalima, temperature itd. Prirodno provjetranje kod dvosmjernih putnih tunela se značajno može poboljšati primjenom centralnog ventilacionog šahta. Prema našim propisima kod tunela dužih od 100m mora se računski provjeriti mogućnost prirodnog provjetranja. U svijetu ima primjera da je zadovoljavajuće prirodno provjetranje pod određenim uslovima moguće i kod tunela dužine skoro 3000m.

Kada prirodno provjetranje nije dovoljno primjenjuje se vještačko - mehaničko provjetranje. U zavisnosti od načina dovođenja svežeg vazduha i načina odvođenja zagađenog vazduha vještačko provjetranje može biti: podužno, poprečno ili polupoprečno.

### a) Podužno provjetranje

Kod podužnog provjetranja tunelska cijev služi i za dovod svežeg i za odvod zagađenog vadauha. Longitudinalna – podužna ventilacija je najjednostavniji i najjeftinija forma ventilacije tunela. Kod podužnog sistema (sl. 1.18.a), u tunelima sa jednim smjerom saobraćaja najčešća je primjena mlaznih ventilatora ("jet fen") koji se postavljaju u kaloti tunela na odgovarajućem rastojanju (oko 100m) i svojim mlazom "guraju" vazduh u pravcu kretanja vozila. Ovaj metod ventilacije se često koristi kod kratkih gradskih tunela sa velikom gustinom saobraćaja (sl. 1.18.b).

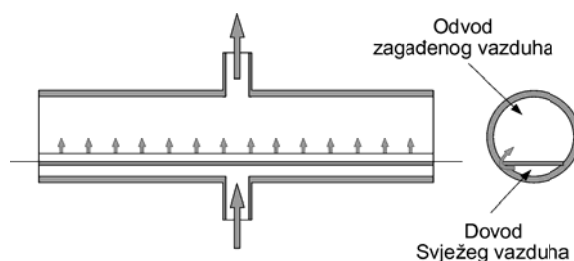


Sl.1.18. Osnovna forma podužnog provjetranja

Sa povećanjem dužine tunela ovaj sistem gubi na efikasnosti, pa je njegova primjena orijentaciono ograničena na dužinu tunela od oko 2000m, odnosno na dužinu koja odgovara maksimalno dozvoljenoj brzini strujanja vazduha u tunelu od oko 10m/s. Longitudinalni sistem je manje pogodan za dvosmjernan saobraćaj, posebno sa aspekta bezbjednosti u slučaju požara u tunelu.

### b) Polu-poprečno provjetranje

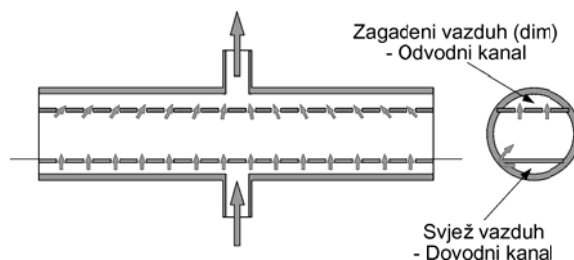
Polu-poprečno provjetranje zahtjeva dovod svježeg vazduha posebnim kanalom, dok se tunelska cijev koristi za odvod zagađenog (sl.1.19). Uduvavanje svježeg vazduha se obično vrši u nivou neposredno iznad kolovoza, dok topli izduvni gasovi idu naviše i koncentrišu se u gornjoj polovini visine tunela. Polu-transverzalni sistem se obično primjenjuje za tunele dužine do oko 3000m dužine.



Sl. 1.19. Osnovna forma polu-poprečnog provjetranja

### c) Poprečno provjetranje

Kod dugačkih tunela uglavnom se primjenjuje poprečna vještačka ventilacija, za koju je neophodno izgraditi posebne kanale za dovod svježeg vazduha i odvod zagađenog vazduha (sl.1.20).



Sl. 1.20. Osnovna forma poprečnog provjetranja

Svež vazduh se dovodi sa obje ili samo sa jedne strane iznad kolovoza, a zagađeni vazduh se odvodi u gornjem dijelu poprečnog profila tunela. Poseban problem kod dugih tunela predstavlja definisanje scenarija za upravljanje ventilacionim sistemom pri pojavi požara u tunelu. U uslovima požara, od ventilacionih sistema se zahtjeva automatski prelazak na poseban režim rada koji omogućuje maksimalno izvlačenje dima iz zone u kojoj se desio požar. U savremenim tunelima

neophodno je uspostaviti integralni sistem nadzora kako bi se postigao zadovoljavajući stepen sigurnosti. Na primjer, neophodno je povezivanje ventilacionog sistema sa sistemom senzora koji detektuju požar ili druge incidentne situacije u tunelu.

### **1.5.3. Energetska postrojenja**

Osvjetljenje i ventilacioni sistem, kao i pumpe za drenažu ako postoje, kod putnih tunela zahtjevaju snabdjevanje električnom energijom. Kraće tunele je moguće snabdjevati električnom strujom odgovarajućeg napona iz transformatorskog postrojenja koje se nalazi izvan tunela. Ovakav sistem napajanja je moguće primjeniti do dužine tunela od oko 2000m, a kod dužih tunela gubitci na električnim kablovima su takvi da je neopravdano, a kod vrlo dugih tunela nemoguće snabdjevati sve uređaje u tunelu iz transformatorskog postrojenja koje se nalazi izvan tunela, pa je u samom tunelu neophodno obebjediti prostor za njihovo smještanje.

Uobičajeno je da se za smještanje transformatorskih postrojenja, na potrebnim rastojanjima, grade proširenja ili bočne kaverne. Broj, veličina i kapacitet transformatorskih postrojenja prvenstveno zavisi od instalisane snage osvjetljenja, ventilacionog sistema i potrebe za funkcionisanjem minimuma sistema u slučaju kvara ili remonta pojedinih dijelova energetske postrojenja.

Osnovno napajanje električnom energijom tunela je iz elektrodistributivne mreže. Za duge i vrlo duge tunele neophodno je predvidjeti električno napajanje sopstvenim agregatom. Na sistem rezervnog napajanja priključuju se potrošači koji omogućavaju nesmetano odvijanje saobraćaja (ali uz znatno redukovani komfor) i potrošači koji zbog bezbjednosti saobraćaja ne smiju ostati bez električne energije.

Visokonaponski kablovi se obično smještaju u "kanal" na jednoj strani tunela ispod nivelete kolovoza. Jedan dio kablova je neophodno voditi na posebnim konstrukcijama – regalima, koje se obično istovremeno koriste kao noseći sistem za postavljanje svjetiljki.

### **1.5.4. Protiv požarna zaštita u saobraćajnim tunelima**

Duge saobraćajne tunele karakteriše naglašen problem protivpožarne zaštite. U ovom trenutku u Evropi se nakon nekoliko velikih požara koji su se dogodili u dugim tunelima u zadnjih deset godina, *tabela 1.2*, preispituje i poboljšava regulativa iz ove oblasti i iznalaze nova tehnička rješenja i sistemi za prevenciju, gašenje požara i evakuaciju iz tunela. Pri tome, definisanje tehničkih kriterijuma za procjenu potrebe primjene pojedinih sistema, postrojenja ili opreme za aktivnu protivpožarnu zaštitu korisnika tunela predstavlja jedan od najvažnijih segmenata tehničke

regulative. Zaštita od požara uključuje bilo koji sistem ili opremu koja pomaže u prevenciji, detekciji, dojavu i gašenju požara.

Požar u saobraćajnim tunelima u toku eksploatacije mogu izazvati: sudar vozila (vozova), samozapaljenje vozila ili zapaljivog tereta, elektroinstalacije, sabotaze i vandalizmi. Tokom požara razvija se temperatura i do 1350°C, koja može ozbiljno da ošteti betonsku i čeličnu oblogu tunela. Pored aktivne protivpožarne zaštite, koja je usmjerena ka gašenju požara, pasivna protivpožarna zaštita kod tunela ima za cilj zaštitu od vatre konstruktivnih elemenata, kablova, ventilacionih kanala, mehaničkih i električnih postrojenja.

**Tabela 1.2. Veliki požari u dugim saobraćajnim tunelima u Evropi**

Tunel (zemlja)	Tip	Dužina (m)	Trajanje požara	Broj stradalih	Godina
Great Belt <i>Danska</i>	Željeznički	8.000	7 sati	bez	1994
Chanel <i>UK-Francuska</i>	Željeznički	50.500	9 sati	bez	1996
Mont Blanc <i>Francuska-Italija</i>	Putni	11.600	50 sati	39	1999
Tauern <i>Austrija</i>	Putni	6.400	17 sati	12	1999
Kaprun <i>Austrija</i>	Željeznički	3.300	1-2 sata	159	2000
Gothard <i>Švajcarska</i>	Putni	17.000	24 sata	11	2001

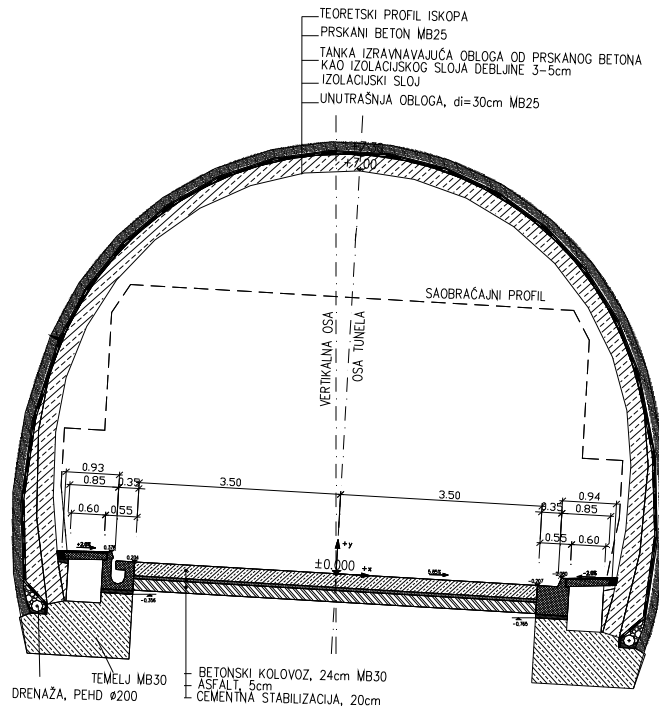
Pored dužine tunela na aktivnu protivpožarnu zaštitu u putnim tunelima značajan uticaj ima i gustina saobraćaja na osnovu koje se definiše ugoženost ljudi u slučaju požara. Projekat protivpožarnih mjera i sistema za gašenje požara definiše: broj protivpožarnih aparata i njihovo rastojanje duž tunela, broj i položaj hidranata, primjenu automatskih prskalica itd. Skoro rekonstruisan tunel "Lokve" (1117m) na magistralnom putu Berane – Rožaje opremljen je sistemom za detekciju i automatsku dojavu požara. U nišama-kutijama za hitne situacije raspoređenim na svakih 75m, postavljena su telefon i po dva protivpožarna aparata za gašenje svih vrsta požara (sa automatskom dojavom požara pri podizanju aparata).

Kod dugih tunela osnovna uloga forsirane ventilacije u trenutku pojave požara je da se korisnicima tunela obezbjedi uslovi da bezbjedno pobjegnu sa mjesta incidenta. Drugo, ventilacija treba da obezbjedi da vatrogasci mogu doći do mjesta požara u cilju sprečavanja širenja požara i njegovog gašenja. U zavisnosti od primjenjenog sistema ventilacije za moguće scenarije (mjesto, vrijeme, intenzitet požara i td.) neophodno je obezbjediti adekvatan rad ventilacionih sistema. Kod izuzetno dugih tunela neophodno je izgraditi i pomoćne tunele za evakuaciju.

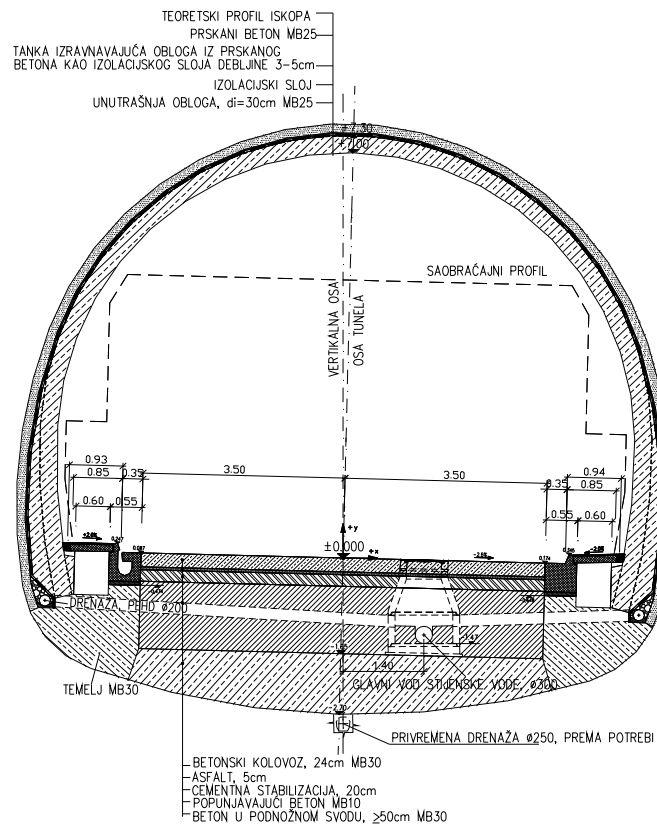
#### 1.5.5. Ostale instalacije u putnim tunelima

Dugi putni tuneli zbog bezbjednosti, opšte i saobraćajne, i pravilnog rada osvjetljenja, ventilacije pored nabrojanih instalacija sadrže i instalacije: telefonije, video nadzora, mjerenja količine štetnih gasova, saobraćajne signalizacije, za detekciju požara.

U tunelima u kojim se očekuje pojava nedozvoljene koncentracije štetnih gasova, zbog velike gustine saobraćaja i slabe prirodne ventilacije neophodno je previdjeti instalacije detekcije štetnih gasova i ventilacije.



SI. 1.21. Poprečni presjek tunela "Sozina" bez podnožnog svoda



SI. 1.22. Poprečni presjek tunela "Sozina" sa podnožnim svodom

U novije vrijeme se u dugim i vrlo dugim tunelima postavljaju instalacije za korišćenje mobilne telefonije i radija, zatim instalacije za kontrolu gabarita i brzine kretanja vozila. Za ove tunele je obavezno i postavljanje kontrolnog (dispečerskog) centra sa nadležnim osobljem za nadziranje.

Na slikama 1.21. i 1.22. prikazana su dva karakteristična poprečna presjeka saobraćajnog tunela "Sozina".

## 2. STANJE NAPONA OKO PODZEMNOG OTVORA

Prirodna stijenska masa se nalazi pod uticajem gravitacije tj. sopstvene težine, i eventualno dopunskih sila koje su posledica procesa formiranja zemljine kore. Napregnutost stijenske mase tj. prisustvo značajnog primarnog-početnog naponskog stanja je bitna karakteristika stijenske mase koja ima značajan uticaj na ponašanje stijenske mase u interakciji sa procesom iskopa i podgrađivanja, pri čemu se stvara mogućnost deformacija (pomjeranja) uslovljenih položajem, veličinom i oblikom iskopa. Paralelno sa iskopom, da bi se održala željena geometrija prostora koji se stvara iskopom, formira se podgradna konstrukcija koja ograničava deformaciju stijenske mase, a preuzima sile koje se obično definišu kao "pritisak stijenske mase na podgradnu konstrukciju".

Određivanje veličine sila koje djeluju na podgradnu konstrukciju je kompleksan problem koji zavisi od mnogih faktora među kojima se mogu izdvojiti kao najznačajniji: veličina iskopa, krutost podgradne konstrukcije, dubina na kojoj se nalazi iskop, geometrijski odnosi nepodgrađenog i podgrađenog dijela iskopa i sposobnost stijenske mase da mobiliše otpornost na lom.

### 2.1. Prirodno stanje napona u terenu (prirodna napregnutost)

Stanje napona u stijenskoj masi prije iskopa obično se definiše kao primarno ili inicijalno naposko stanje i predstavlja naponsko stanje prirodne ravnoteže. Ovo stanje napona, blizu površine terena, do dubine uobičajene za izgradnju podzemnih konstrukcija, zavisi prvenstveno od:

- težine stijene,
- tektonskih sila,
- diskontinuiteta i
- ograničenja bočne ekspanzije.

Najčešće su maksimalni naponi pritiska koji se javljaju u stijenskoj masi *vertikalni naponi*  $\sigma_v = \sigma_1$  (ili naponi bliski verikalnom), dok *horizontalno polje napona* varira kao horizontalna elipsa u odnosu  $0.15 < \sigma_v / \sigma_h < 0.6$ , tj. postoji naponska anizotropija u horizontalnom polju napona. Moguća je situacija u kojoj je horizontalni napon najveći napon pritiska kao posledica djelovanja tektonskih sila ili erozije, no ova situacija je ograničena na pojedine regione zemljine kore i nije karakteristična za naše područje.

Samo postojanje napona u ljudskim djelovanjem neporemećenoj stijenskoj sredini i njihov znatan intenzitet (u odnosu na prirast napona uzrokovan izgradnjom podzemne građevine) nameće potrebu definisanja polja primarnih napona u procesu ispitivanja nekog naponsko zavisnog fenomena na zatom mjestu prirodne stijenske sredine. Zbog velikog broja faktora koji su bili od uticaja na stijensku masu u geološkoj istoriji, realno polje primarnih napona moguće je odrediti jedino terenskim mjerenjima. U pojedinim slučajevima upotrebljivu sliku primarnih napona moguće je dobiti na osnovu idealizovanih računskih modela. Prema tome, dva su osnovna pristupa pri

kvantifikaciji tj. definisanju polja primarnih napona u stijenskoj masi: teoretski pristup i mjerenjem "in situ".

### 2.1.1. Teoretski pristup definisanja polja primarnih napona

U pojedinim slučajevima moguće je na osnovu idealizovanih računskih modela dobiti upotrebljivu sliku primarnog polja napona. Opšta teorija za definisanje primarnih napona u stijenskoj masi nije još uvijek formulisana. Ovdje će se izložiti dva klasičana (konzervativna) teoretska modela za definisanje primarnih napona.

#### a) Heim-ova teorija (1878)

Prema Heim-ovoj teoriji vertikalna komponenta napona  $\sigma_v$  zavisi od težine nadsloja:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h \quad (2.1)$$

$\gamma$  - zapreminska težina stijenske mase

$h$  - dubina posmatrane tačke

Horizontalni napon je jednak vertikalnom:

$$\sigma_v = \sigma_h \quad (2.2)$$

odakle slijedi da je:

$$\lambda = \sigma_h / \sigma_v = 1.0 \quad (2.3)$$

gdje je:

$\lambda$  - odnos horizontalnog i vertikalnog napona

Često se Heim-ova teorija tretira kao Pascal-ov zakon za tečnosti:

$$P = \gamma \cdot h$$

$$\sigma_v = \sigma_h$$

$$\lambda = \sigma_h / \sigma_v = 1.0$$

tj. pritisak je jednak u svim pravcima, pa je i napon smicanja jednak nuli. Generalno je dokazano da sa dubinom napon smicanja u stijenskoj masi opada, pa za duboke iskope ova ideja ima svoj smisao.



**b) Terzaghi-jev pristup - primarno stanje napona u homogenom, izotropnom i elastičnom poluprostoru**

U jednoj sasvim regularnoj geološkoj situaciji, u kojoj čestice stijenske sredine nemaju horizontalne komponente pomjeranja ( $u_x = u_y = 0$ ), iz jednačina ravnoteže u homogenom i izotropnom poluprostoru, vertikalni napon na dubini  $z$  (sl. 2.1), uzimajući da je ubrzanje zemljine teže konstantno (što je realno obzirom na dubinu podzemnih konstrukcija), može se izraziti kao:

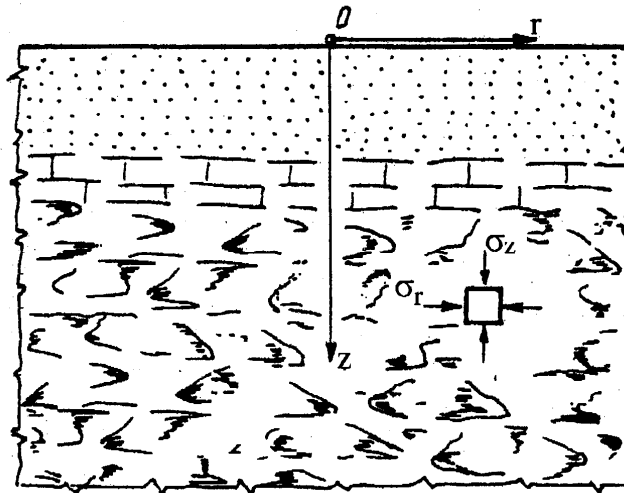
$$\sigma_v = \sigma_z = \gamma z \quad (2.4)$$

Odgovarajući bočni napon je, s obzirom na preuzetu homogenost, jednak u svim pravcima, a kada se mehaničko ponašanje slojeva unutar jedne zapreminske težine može opisati generalisanim Hooke-ovim zakonom, iznosi:

$$\sigma_h = \sigma_x = \sigma_y = \frac{z\gamma}{m-1} = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_v = \lambda_0 \sigma_v \quad (2.5)$$

što slijedi iz uslova da je bočna horizontalna deformacija jednaka nuli,  $\varepsilon_h = \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ , odnosno:

$$\frac{1}{E} \left[ \sigma_x - \frac{1}{m} (\sigma_y + \sigma_z) \right] = \frac{1}{E} \left[ \sigma_y - \frac{1}{m} (\sigma_x + \sigma_z) \right] = 0 \quad (2.6)$$



Sl. 2.1 Primarni naponi u regularnoj sredini

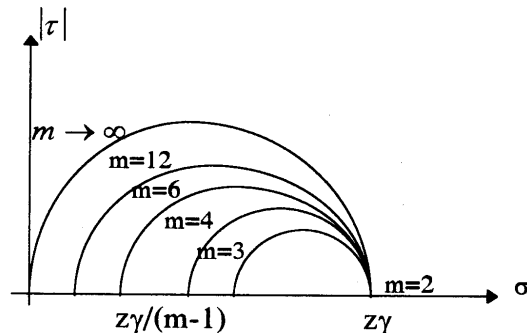
Tenzor napona ima oblik,

$$F_p = F_p(z) = \begin{vmatrix} z\gamma & 0 & 0 \\ 0 & \frac{z\gamma}{m-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z\gamma}{m-1} \end{vmatrix} = F_p(x, y, z) \quad (2.7)$$

Vertikalni pravac je pravac većeg glavnog napona i važi relacija:

$$z\gamma \geq \frac{z\gamma}{m-1} \geq 0 \quad (2.8)$$

Prema ovom teoretskom dokazu klasične prirode, stanje napona, stanje napona je funkcija isključivo dubine  $z$  i parametarskih konstanti  $\gamma$  i  $m$ . Na slici 2.2. može se pratiti naponsko stanje preko Mohr-ovih krugova za različite vrijednosti Poisson-ovog broja. Vrijednost  $m = 2$  odgovara tečnosti, dok kada  $m \rightarrow \infty$  materijal teži apsolutno krutom tijelu. Naponsko polje realno značajno zavisi od odgovarajuće težine stijenske mase, pa ovaj model, mada sa dosta pretpostavki, u odgovarajućoj geološkoj situaciji može dati upotrebljive rezultate.



**SI.2.2** Mohr-ovi krugovi napona za primarno stanje napona za različit Poisson-ov broj

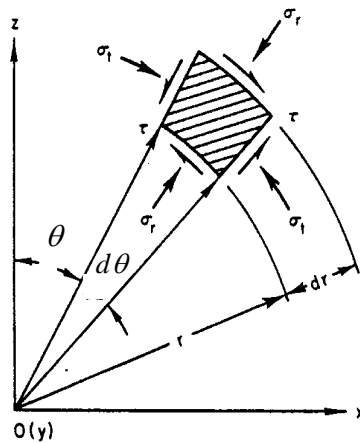
Upotrebijene oznake imaju slijedeće značenje:

- $\sigma_v$  - vertikalna komponenta normalnog napona
- $\sigma_h$  - horizontalna komponenta normalnog napona
- $z$  - vertikalna dubina ispod površine terena
- $\mu$  i  $m$  - Poisson-ov koeficijent i broj (respektivno)
- $\lambda_0 = \sigma_v / \sigma_h$  - odnos vertikalnog i horizontalnog napona  
(konstantan je u polju napona)

Prema ovom teoretskom dokazu klasične prirode, stanje napona je funkcija isključivo dubine  $z$  i parametarskih konstanti  $\gamma$  i  $\nu$ . Dakle stanje napona ne zavisi od modula elastičnosti stijenskog materijala.

U cilindručnom koordinantnom sistemu, peikazanom na sl. 2.3., jednačine za primarno stanje napona dobijaju oblik:

$$\begin{aligned} \sigma_r^o &= \frac{1}{2}(P_v + P_h) + (P_v - P_h)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta^o &= \frac{1}{2}(P_v + P_h) - (P_v - P_h)\cos 2\theta \\ \tau_{r\theta}^o &= -\frac{1}{2}(P_v - P_h)\sin 2\theta \end{aligned} \quad (2.9)$$



Sl. 2.3. Cilindrični koordinatni sistem

ili napisano na drugi način:

$$\begin{aligned}\sigma_r^o &= \frac{P_v}{2} [(1 + \lambda) + (1 - \lambda) \cos 2\theta] \\ \sigma_\theta^o &= \frac{P_v}{2} [(1 + \lambda) - (1 - \lambda) \cos 2\theta] \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{P_v}{2} (1 - \lambda) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (2.10)$$

Odnos vertikalnog i horizontalnog napona i teoretski za elastičnu, izotropnu kontinualnu sredinu uzima vrijednost od  $0 < \lambda_0 < 1.0$ , dok se za realnu stijensku masu kreće od  $0.3 < \lambda_0 < 3.5$ . Poboljšanje date idealizacije može se izvesti uz upotrebu kvazi *Poisson-ovog* broja koji nije konstanta i zavisi od *Poisson-ovog* broja, geoloških faktora i drugih faktora uticajnih na horizontalne napone. Njegove vrijednosti se mjere na terenu.

### 2.1.2. Definisanje polja primarnih i sekundarnih napona mjerenjem na terenu

Metode mjerenja primarnih napona na terenu mogu se svrstati u **statičke** i **dinamičke metode**.

**Statičke metode** omogućuju mjerenje napona u apsolutnim iznosima i zasnivaju se na oslobađanju napona i njihovom ponovnom uspostavljanju. U statičke metode se ubraju ili se najčešće izvode sledeće metode:

- metoda oslobađanja napona jezgrovanjem
- metoda sa centralnom bušotinom
- metoda hidrauličkog jastuka
- *Ticelinova* metoda

**Dinamičke metode** daju uvid u raspodjelu napona u funkciji od udaljenosti od iskopa, ali ne i njihove apsolutne veličine. Kod dinamičkih metoda najčešće se vrši mjerenje brzine longitudinalnih seizmičkih talasa.

Kombinovanjem statičkih i dinamičkih metoda moguće je uspostaviti korelacione veze i njih koristiti za izradu inženjersko geoloških modela po parametru napona.

### a) Oslobađanje napona jezgrovanjem

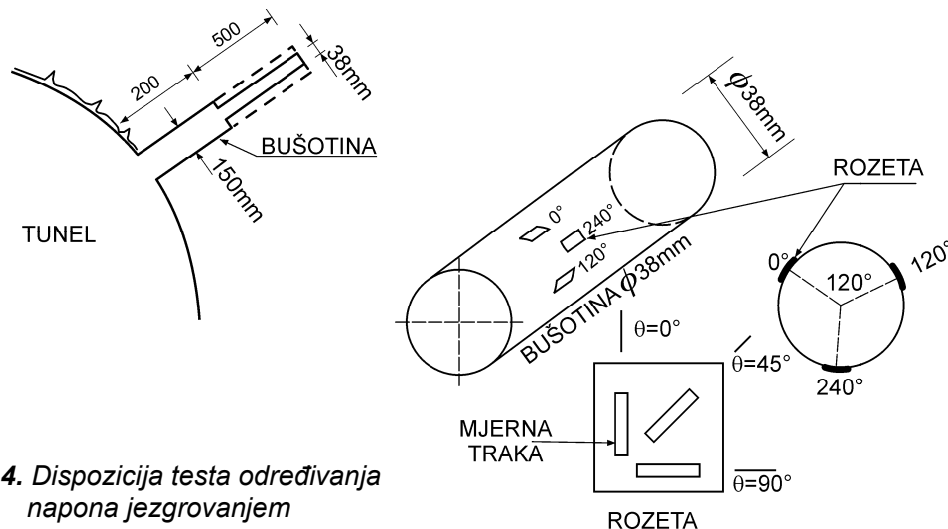
Postupak oslobađanja napona jezgrovanjem je prikazan na *sl. 2.4*.

Procedura za izvođenje testa je sljedeća:

1. izvede se bušotina  $d = 150\text{mm}$ ; dužine  $l = 200\text{mm}$ ;
2. izvede se produžetak bušotine  $d = 38\text{mm}$ ; dužine  $l = 500\text{mm}$ ;
3. na zidove bušotine od  $d = 38\text{mm}$  se postave tri rozete pod centralnim uglom  $120^\circ$ , izmjeri se početno stanje otpora u rozetama (očita se nulto stanje);
4. nastavi se sa bušenjem  $d = 150\text{mm}$  narednih  $l = 500\text{mm}$ , tako da se oslobode primarni naponi koji su djelovali na cilindar  $d = 38\text{mm}$ ;
5. izmjere se promjene deformacija preko mjernih traka u rozetama.

Da bi se došlo do primarnog naponskog stanja koriste se naponsko-deformacijske veze za cilindrično tijelo koje postoje u zatvorenom matematičkom obliku. Treba napomenuti, da ako je poznato deformacijsko polje moguće je jednoznačno doći do napona, dok obrnuta veza po pravilu nije jednoznačna. Za proračun je neophodno poznavati modul elastičnosti i Poissonov koeficijent stijenskog materijala, koji se dobija iz uzoraka jezgra pri bušenju.

Ukoliko se bušenjem dovoljno udaljimo od otvora iz kog se vrši bušenje, osim sekundarnih, moguće je mjeriti i primarne napone.



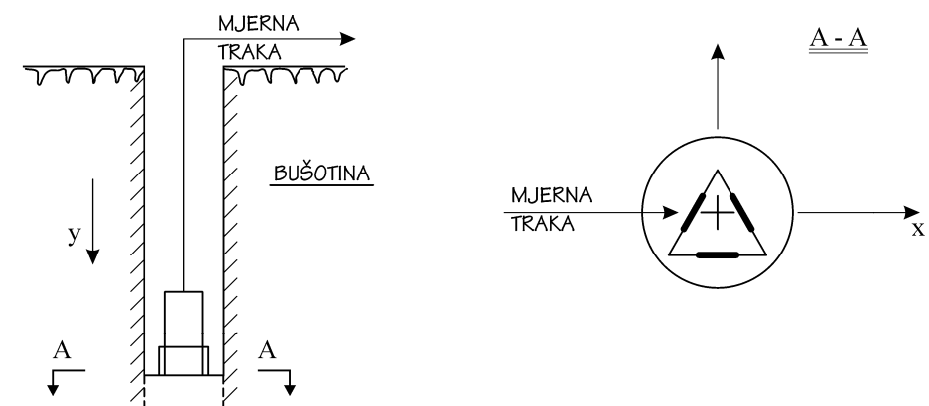
**Sl. 2.4.** Dispozicija testa određivanja napona jezgrovanjem

### b) Metoda sa centralnom bušotinom

Postupak sa centralnom bušotinom je prikazan na sl. 2.5.

Procedura za izvođenje testa je sljedeća:

1. izvede se bušotina;
2. na dno bušotine se postavi rozeta i izvrši nulto mjerjenje;
3. nastavi se sa bušenjem minimum dva dijametra bušotine;
4. izmjere se promjene deformacija preko mjernih traka u rozetama;
5. preko deformacija se sračuna stanje napona.



Sl. 2.5. Dispozicija testa određivanja napona metodom sa centralnom bušotinom

Da bi se došlo do primarnog naponskog stanja koriste se naponsko-deformacijske veze za cilindrično tijelo tj. deformacije baze cilindra, koje postoje u zatvorenom matematičkom obliku. Za proračun je neophodno poznavati modul elastičnosti i Poissonov koeficijent stijenskog materijala, koji se dobija iz uzoraka jezgra pri bušenju.

Ukoliko se bušenjem dovoljno udaljimo od otvora iz kog se vrši bušenje, osim sekundarnih, moguće je mjeriti i primarne napone.

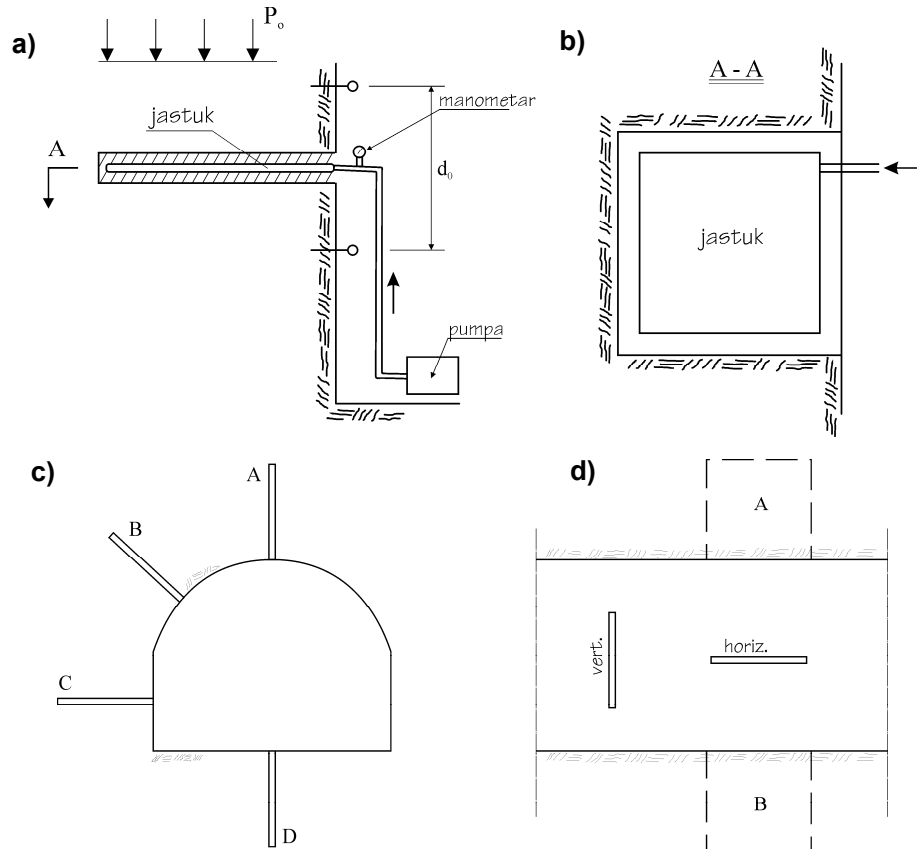
### c) Hidraulički jastuk

Postupak određivanja napona metodom hidrauličkog jastuka je prikazan na sl. 2.6.

Procedura za izvođenje testa je sljedeća:

1. postave se reperi za mjereneje deformacija u pravcu određivanja napona (upravno na ravan hidrauličkog jastuka, sl. 2.6.a i 2.6.b) i izmjeri nulto stanje, tj. razmak između repera;
2. izvrši se rezanje prosjeka upravno na pravac u kom se žele mjeriti naponi sl. 2.6.a;
3. postavi se hidraulički jastuk u prosjek, a prostor u prosjeku se ispuni malterom - gustom cementnom injekcionom masom;

4. izmjere se promjene deformacija zbog presjeka;
5. pumpanjem ulja u hidraulički jastuk deformacija se vrati na prvobitno stanje;
6. izmjeri se pritisak u manometru u trenutku kada su se deformacije vratile na prvobitno stanje (ustanovljava se mjerenjem dužine između repera).



Sl. 2.6. Dispozicija testa određivanja napona metodom hidrauličkog jastuka

Izmjereni pritisak predstavlja naponsko stanje u stijenskoj masi. Prednost postupka je što se naponi mjere direktno u željenom pravcu, a nedostatak je što je moguće mjeriti napone samo u jednom pravcu, pa je za određivanje napona u više pravaca neophodno ponavljani test sa različitom orijentacijom jastuka, kako je prikazano na slici 2.6.c i 2.6.d. Ovom metodom se mjere samo sekundarni naponi.

#### d. Ticelinova metoda

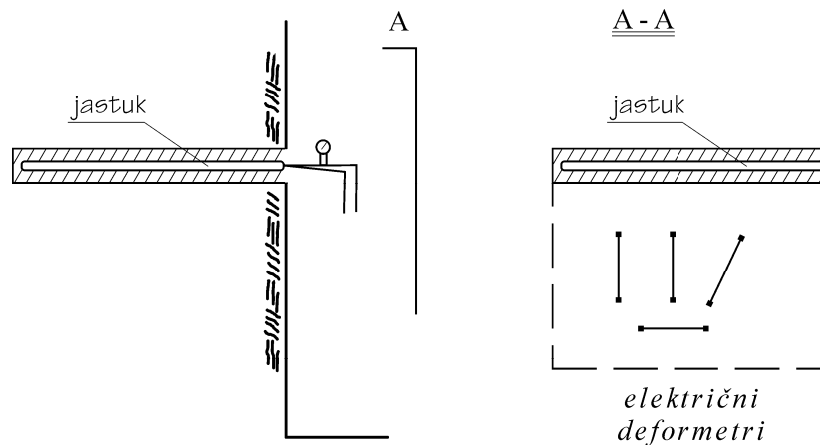
Postupak određivanja napona Ticelinovom metodom je prikazan na sl. 2.7.

Procedura za izvođenje testa je sljedeća:

1. postave se mjerne trake na zid iskopa;
2. izvrši se rezanje presjeka kao kod metode hidrauličkog jastuka;
3. postavi se hidraulički jastuk u presjek (popunjen malterom);
4. izmjere se promjene deformacija zbog presjeka;

5. pumpanjem ulja u hidraulički jastuk deformacija se vrati na prvobitno stanje;
6. izmjeri se pritisak u manometru u trenutku kada su se deformacije vratile na prvobitno stanje (ustanovljava se mjernim trakama).

Naponi se mjere direktno u željenom pravcu (prednost), nedostatak je što je moguće mjeriti napone samo u jednom pravcu, pa je za određivanje napona u više pravaca neophodno ponavljani test sa različitom orijentacijom jatuka. Mjere se samo sekundarni naponi.



SI. 2.7. Dispozicija testa određivanja napona Ticelinovom metodom

## 2.2. Sekundarno stanje napona oko otvora u stijenskoj masi

### *Formiranje sekundarnih napona oko iskopa u stijenskoj masi*

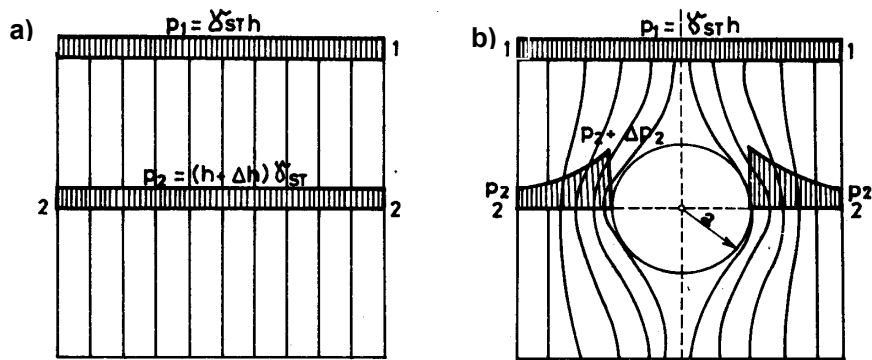
Iskop u stijenskoj masi indukuje poremećaje primarnog stanja napona. Novoformirano stanje se obično definiše kao sekundarno stanje napona. Saglasno principu lokalnog dejstva, poremećaji primarnog stanja napona su ograničeni samo na užu okolinu oko otvora i uglavnom su posledica:

- težine nadsloja stijenske mase,
- veličine horizontalnih napona,
- promjene svojstava stijenske mase oko iskopanog otvora, i
- zapreminske deformacije stijenske mase zbog termičkih promjena ili bubrenja indukovanog fizičkim ili fizičko-hemijskim procesima.

### *Redistribucija (bifurkacija) napona oko kružnog otora u elastičnoj sredini*

Izradom podzemnog objekta naponsko polje se menja tako da okolna stijenska masa prima napone koji su vladali na tom mjestu. Na slici 2.8. jasno se ilustruje tok trajektorija glavnog napona pritiska prije i posle iskopa kružnog otvora. Nakon iskopa u zoni oko otvora dolazi do priraštaja

napona u odnosu na primarno stanje napona (sl. 2.8.b.) u odnosu na primarno stanje napona (sl. 2.8.a).



Sl. 2.8. Trajektorije napona prije i posle iskopa kružnog poprečnog presjeka

Obim zone poremećaja zavisi od oblika i veličine otvora, te se u svakom posebnom slučaju nameće potreba definisanja intenziteta i dubine zone poremećaja. Uticaj poremećaja opada i na udaljenosti, i za oko  $4a$  (gdje je  $a$  poluprečnik otvora) poremećaj opada na oko 6% veličnine primarnog napona. Obično su od praktičnog značaja promjene do rastojanja jedne polovine dijametra otvora (dakle  $2a$ ).

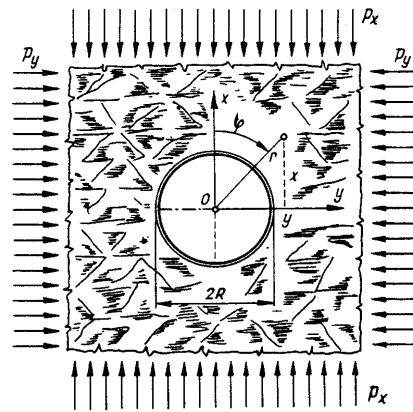
### 2.2.1. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora

U ovom poglavlju će se prezentovati neka rješenja klasične prirode koja se mogu primjeniti na druge oblasti tehnike, a vezana su za stanje napona oko kružnog otvora. Ako se razmatra sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora u stijenskoj masi do rješenja u zatvorenom matematičkom obliku je moguće doći ako se uvedu izvjesne pretpostavke i pojednostavljenja, i to:

- stijenska masa je kontinuum i pri tome linearno elastična, izotropna i homogena,
- spriječeno je bočno kretanje mase ili stijenska masa je potpun poluprostor,
- nema djelovanja tektonskih sila na veličinu horizontalnih napona.

Pri ovim pojednostavljenjima je moguće u kružnim otvorom oslabljenoj stijenskoj masi, korišćenjem teorije elastičnosti, sračunati sekundarna naponsko-deformacijska stanja u stijenskoj masi. U nastavku se daje nekoliko rješenja klasične prirode za sekundarno stanje napona oko kružnog otvora u elastičnom, izotropnom i homogonom materijalu pri različitim stanjima primarnog napona sredine tj. graničnim uslovima.

Na sl. 2.9. prikazan je kružni otvor u stijenskoj masi, cilindrični koordinatni sistem  $(r, \theta)$  i granični uslovi.



Sl. 2.9. Kružni otvor u stijenskoj masi sa graničnim uslovima



Za analizu napona oko kružnog otvora najpogodnije su cilindrične koordinate. u kojima uslov ravnoteže za ravno stanje deformacija glase:

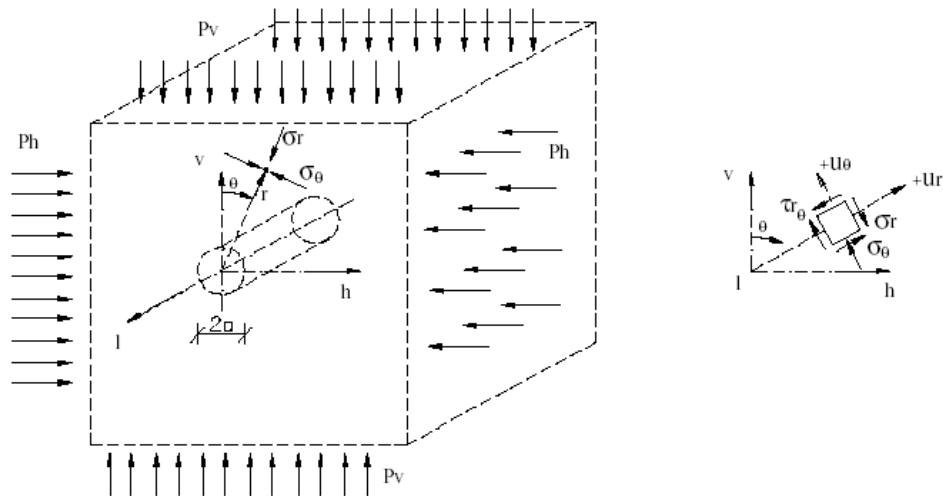
$$\varepsilon_x = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \quad (2.13)$$

Granični uslovi pri naponskoj analizi oko otvora su:

- za  $r = R$ :  $\sigma_r = 0$  i  $\tau_{r\theta} = 0$   
(dakle radijalni napn na konturi je jednak nuli)
- za  $r \rightarrow \infty$ :  $(\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}) \rightarrow (\sigma_r^o, \sigma_\theta^o, \tau_{r\theta}^o)$  (2.14)  
(tj. naponi za  $r \rightarrow \infty$  teže inicijalnom – primarnom stanju napona)



**Sl. 2.10.** Kružni otvor u elastičnoj sredini (geometrija, primarni naponi i koordinatni sistem)

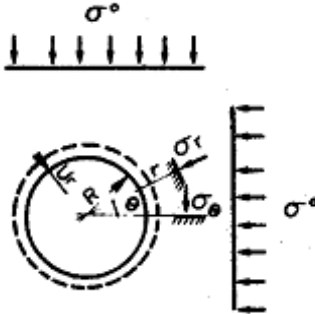
**Napomena:**

Osa  $l$  se označava i kao osa  $z$  kada se koristi Dekartov koordinatni sistem ( $x = h, y = v, z = l$ )

U nastavku ovog poglavlja se daju neka karakteristična rješenja za naponsko stanje oko kružnog otvora uz naprijed navedne pretpostavke, tj. pojednostavljenja uz različite granične uslove.

**2.2.2. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora  
sredina ELASTIČNA - primarno stanje napona IZOTROPNO**

Kako se radi o izotropnom stanju inicijalnih napona, smičući naponi su jednaki nuli, pa se uslovi ravnoteže (2.10 - 2.13) i granični uslovi (2.14) pojednostavljaju i za ovaj specijalna slučaj glase:



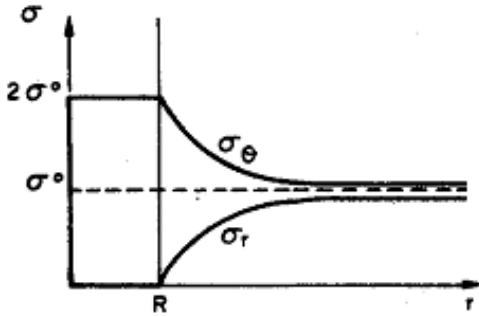
**Jednačina:** 
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

**Granični uslovi:**  $r = 0 : \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma^0$   
 $r = R : \sigma_r = 0$

**RADIJALNA POMJERANJA:**

$$\varepsilon_r = \frac{dU_r}{dr} = -\frac{1}{E}(\Delta\sigma_r - \nu\Delta\sigma_\theta - \nu\Delta\sigma_\xi) = \frac{1+\nu}{E}\sigma^0 \frac{R^2}{r^2}$$

$$u_r = \int_{r=0}^r \frac{1+\nu}{E}\sigma^0 \frac{R^2}{r^2} dr = \frac{1+\nu}{E}\sigma^0 \frac{R^2}{r}$$



**RJEŠENJE ZA NAPONE:**

$$\sigma_r = \sigma^0(1 - \alpha^2)$$

$$\sigma_\theta = \sigma^0(1 + \alpha^2)$$

$$\sigma_\xi = \sigma^0$$

gdje je oznaka  $\alpha = \frac{R}{r}$

**Napomena:**  $(\sigma_\theta)_{r=R} = 2\sigma^0$   
 $\sigma_r$  i  $\sigma_\theta$  - zavise od odnosa  $1/r$ , a nezavisni su od  $E$  i  $\nu$ .

**RJEŠENJE ZA POMJERANJA:**

$$u_r = -\frac{1+\nu}{E}\sigma^0 \frac{R^2}{r}$$

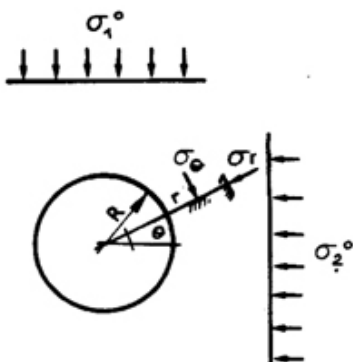
$$(u_r)_{r=R} = -\frac{1+\nu}{E}\sigma^0 R$$

**Napomena:** Zavise od odnosa  $1/r$  i od  $E$  i  $\nu$ .

Dakle, inicijalno naponsko stanje je rotaciono simetrično i oko kružnog otvora u takvoj sredini sekundarno stanje napona, takođe, ostaje rotaciono simetrično.

**2.2.3. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora  
sredina ELASTIČNA - primarno stanje napona ANIZOTROPNO  
- Kiršovo rješenje**

Više autora proučavalo je stanje napona u homogenom, elastičnom poluprostoru, polazeći od osnovne pretpostavke ponašanja idealnog Hukovog tijela. Prvo rješenje za analitičko određivanje napona oko kružnog otvora u elastičnoj sredini data je Kiršovim (*Kirsch*) jednačinama. Rješenja su primjenljiva za situaciju u kojoj je poluprečnik otvora zanemariv u odnosu na dubinu tunela tj. za  $Z \gg a$  i za ravno stanje napona, tj. ploču čije slobodne strane ne primaju nikakve napone ( $\sigma_z = 0$ ).



**Pretpostavka:**  $0 \leq \sigma_2^o \leq \sigma_1^o$

**Jednačine ravnoteže:**

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0$$

**RJEŠENJE:** Metodom Kirša rješenje se dobija primjenom AIRY-jeve biharmonijske funkcije:

$$\phi = A \ln r + Br^2 + (Cr^2 + Dr + \frac{E}{r^2} + F) \cos 2\theta$$

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_1^o + \sigma_2^o) (1 - \alpha^2) - \frac{1}{2} (\sigma_1^o - \sigma_2^o) (1 + 3\alpha^4 - 4\alpha^2) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} (\sigma_1^o + \sigma_2^o) (1 + \alpha^2) + \frac{1}{2} (\sigma_1^o - \sigma_2^o) (1 + 3\alpha^4) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = +\frac{1}{2} (\sigma_1^o - \sigma_2^o) (1 - 3\alpha^4 + 2\alpha^2) \sin 2\theta$$

U literaturi se često koriste i oznake:

$P_v$  - primarni (inicijalni) vertikalni napon

$P_h$  - primarni (inicijalni) horizontalni napon

$\lambda$  - odnos horizontalnog i vertikalnog primarnog napona ( $P_h = \lambda P_v$ ),

pa tada jednačine glase:

Za radijalni napon:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(P_v + P_h) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(P_v - P_h) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_r = \frac{P_v}{2} \left[ (1 + \lambda) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + (1 - \lambda) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right]$$

Za tangenti napon:

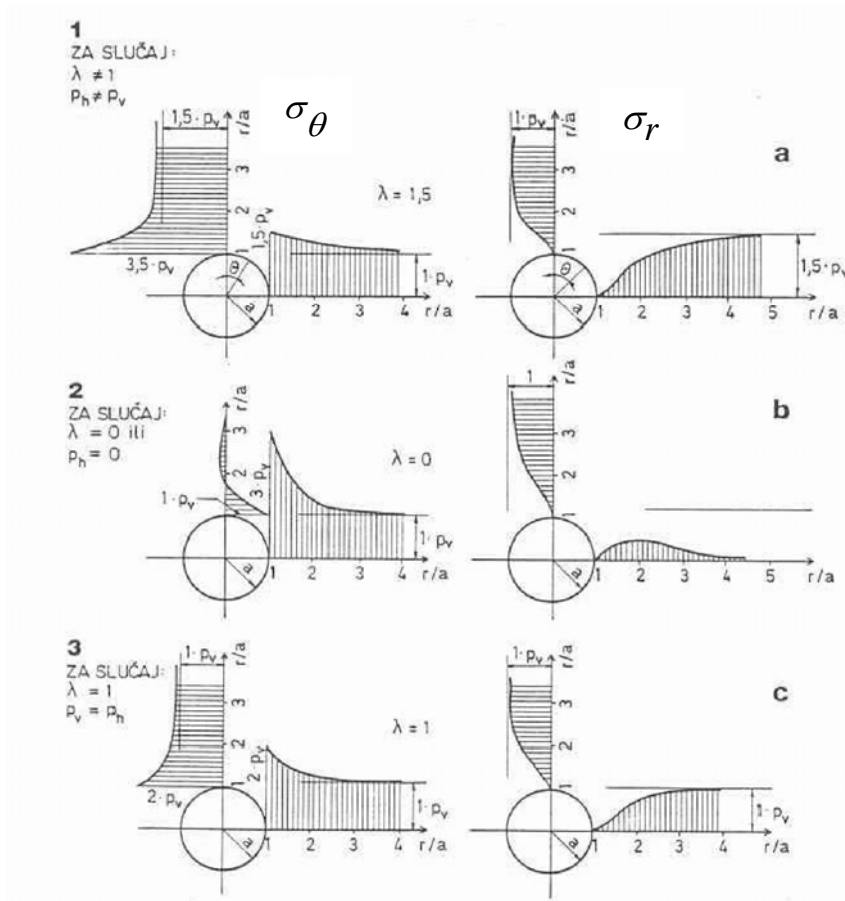
$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(P_v + P_h) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(P_v - P_h) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_v}{2} \left[ (1 + \lambda) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - (1 - \lambda) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right]$$

Za smičući napon:

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(P_v - P_h) \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_v}{2} (1 - \lambda) \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$



**Sl. 2.11.** Grafici sekundarnih napona u zavisnosti od odnosa horizontalnog i vertikalnog primanog napona

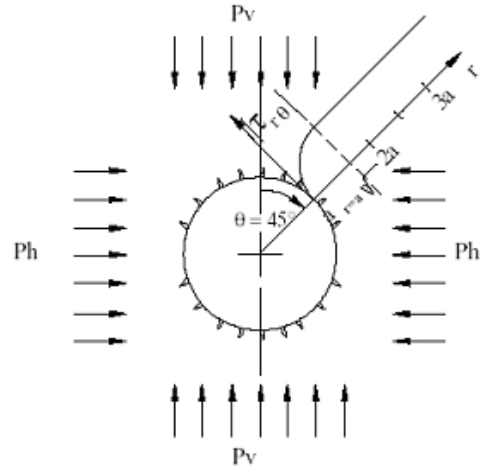
## MAKSIMALNI SMIČUĆI NAPON

za  $\theta = 45^\circ$

$$\tau_{r\theta}(\theta = 45^\circ) = -\frac{P_v}{2}(1-\lambda) \left( 1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4} \right)$$

$$\max|\tau_{r\theta}| = \left( 1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4} \right) \Rightarrow \max$$

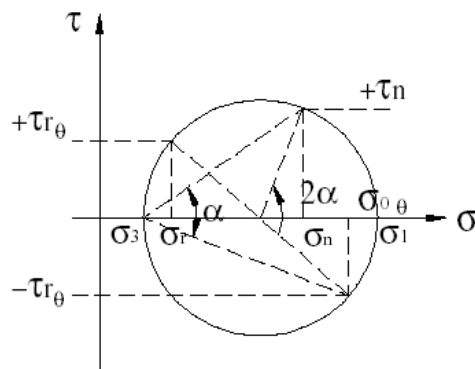
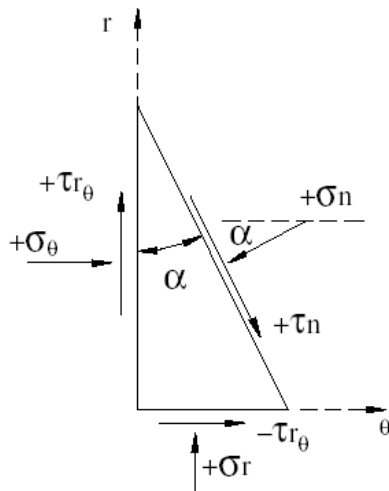
$$\frac{a^2}{r^2} = \frac{1}{3} \Rightarrow r = a\sqrt{3} \Rightarrow \max|\tau_{r\theta}| = \frac{2}{3}P_v(1-\lambda)$$



## Veze komponentalnih napona u ravni:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r)\cos 2\alpha + \tau_{r\theta} \sin 2\alpha$$

$$\tau_n = \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r)\sin 2\alpha + \tau_{r\theta} \cos 2\alpha$$



## RJEŠENJE ZA POMJERNJA:

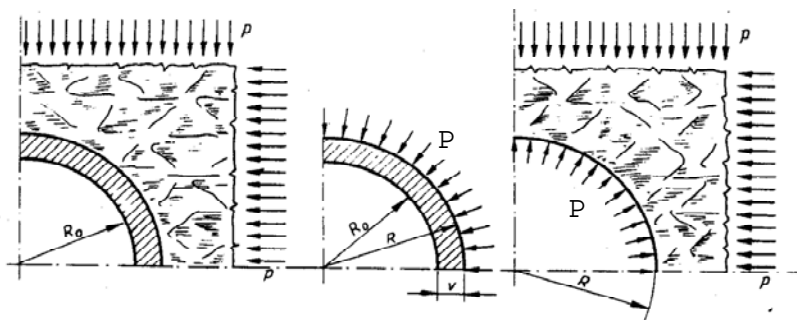
$$u_r = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{p_v a}{2} \left\{ (1+\lambda) \left( 1 + \frac{\nu}{1-\nu} \right) \frac{a}{r} + (1-\lambda) \left[ 4\frac{a}{r} - \left( 1 + \frac{\nu}{1-\nu} \right) \frac{a^3}{r^3} \right] \cos 2\theta \right\}$$

$$u_\theta = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{p_v a}{2} (1-\lambda) \left[ 2 \left( 1 - \frac{\nu}{1-\nu} \right) \frac{a}{r} + \left( 1 + \frac{\nu}{1-\nu} \right) \frac{a^3}{r^3} \right] \sin 2\theta$$

konvencija za:  $u_r(+)$  u smjeru ka osi iskopa  
 $u_\theta(+)$  u smjeru kretanja kazaljke na satu

**2.2.4. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora  
sredina ELASTIČNA - primarno stanje napona IZOTROPNO,  
radijalno reaktivno opterećenje na konturi**

Rješenje za sekundarne napone oko kružnog otvora u elastičnoj sredini, koja je pod izotropnim stanjem napona pri dejstvu rotaciono simetričnog opterećenja na konturi ima značaj za kvalitativno razumjevanje interakcije stijene i podgradne konstrukcije. Pri definisanju pritiska stijenske mase na podgradnu konstrukciju najčešće se interakcija svodi na međusobno dejstvo u radijalnom pravcu, kako je prikazano na sl. 2.6. Pri ovoj aproksimaciji je zanemareno trenje između obloge i stijenske mase.



SI. 2.12. Reaktivno opterećenje obloge

Stanje napona u navedenim uslovima se dobija kao superpozicija rješenja za sekundarno stanje napona oko kružnog otvora pri dejstvu rotaciono simetričnog inicijalnog stanja napona (označeno sa:  $p = p_o = P_v = P_h$ ) i dejstva radijalnog opterećenja ( $P_e$ ) na konturi.

**RJEŠENJE ZA NAPONE**

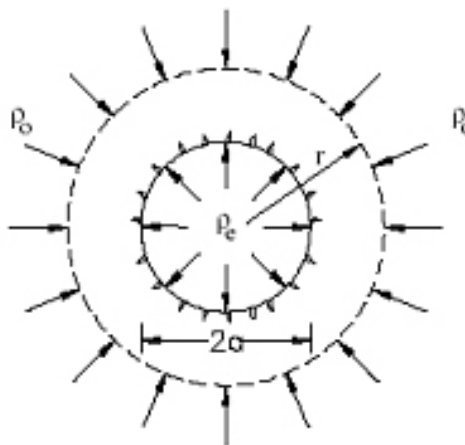
$$\sigma_r = p_o \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + p_e \frac{a^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = p_o \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - p_e \frac{a^2}{r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

pomjeranje na konturi  $r=a$ :

$$u_{re}(a) = \frac{1+\nu}{E} a (p_o - p_e)$$

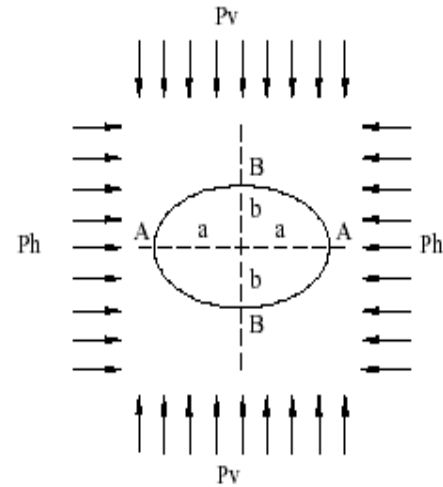


### 2.2.5. Sekundarno ravno stanje napona oko elipsastog otvora u elastičnoj sredini

Ukoliko je primarno stanje napona anizotropno, elipsast otvor predstavlja vrlo pogodan oblik za optimizaciju sekundarnog naponskog stanja. Naime, kod kružnog otvora u tački A dolazi do maksimalnih napona pritiska, a u tački B se može desiti pojava napona zatezanja.

Ako se krug zamjeni elipsom, koja ima veći radijus u pravcu djelovanja većeg primarnog napona, stanje napona postaje povoljnije. Za izračunavanje tangerntnog napona u tačkama A i B se mogu koristiti formule:

$$\begin{aligned}\sigma_{A\theta} &= P_v \left( 1 - \lambda + 2 \frac{a}{b} \right) \\ \sigma_{B\theta} &= P_v \left( \lambda - 1 + 2\lambda \frac{b}{a} \right) \\ \sigma_{Ar} &= \sigma_{Br} = 0 \\ P_h &= \lambda P_v\end{aligned}$$



Optimalna oblik se dobija kada je  $\sigma_{A\theta} = \sigma_{B\theta}$ , pa slijedi:

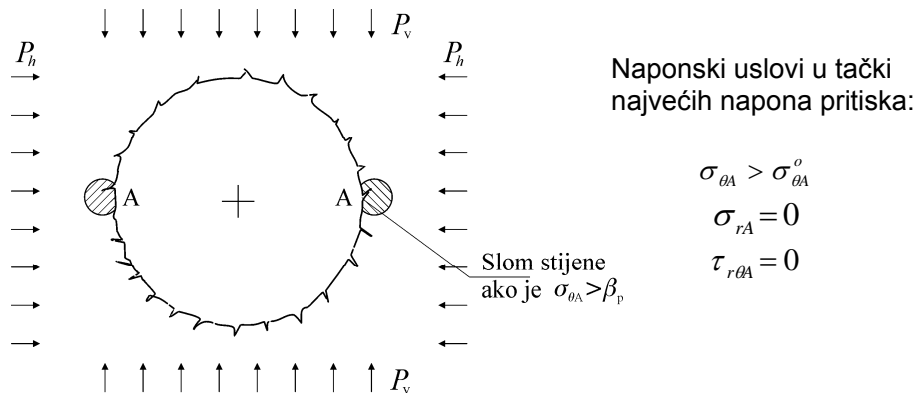
$$\sigma_{A\theta} = \sigma_{B\theta} \Rightarrow \left( 1 - \lambda + 2 \frac{a}{b} \right) = \left( \lambda - 1 + 2\lambda \frac{b}{a} \right) \Rightarrow \lambda = \frac{a}{b}$$

Dakle optimalan oblik eliptičnog otvora je onaj kod kog odnos radijusa  $\frac{a}{b} = \frac{P_h}{P_v}$ .

### 2.3. Formiranje kvaziplastične zone oko iskopa – prekoračenje napona elastičnosti i pojava zone plastičnosti

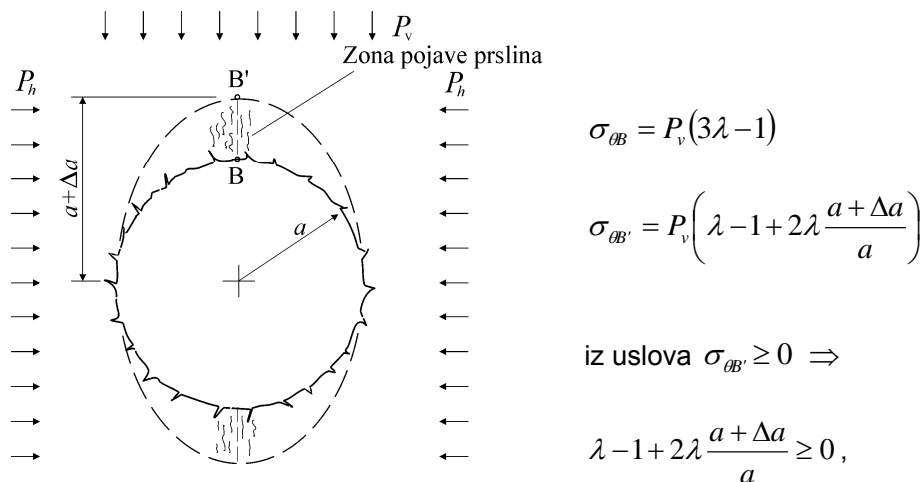
Ukoliko je primarno stanje napona u stijenskoj masi takvo da je  $\lambda < 1$  ( $P_v > P_h$ ), tada je iz predhodne analize napona vidljivo da se najveći naponi pritiska javljaju za ugao  $\theta = 90^\circ$  (tačka A na sl. 2.13), pri tome važi  $\sigma_{\theta A} > \sigma_{\theta A}^o$ .

Ukoliko je tangenti naponi veći od jednoaksijlane čvrstoće stijenskog materijala  $\beta_p$  ( $\sigma_\theta > \beta_p$ ), tada u zoni oko tačke A dolazi do prekoračenja napona elastičnosti i dolazi do pojave zone plastičnosti.



**Sl. 2.13.** Pojava zone plastičnosti

Ukoliko je primarno stanje napona u stijenskoj masi takvo da je  $\lambda < 1$  ( $P_v > P_h$ ), tada se naponi zatezanja mogu javiti za ugao  $\theta = 0^\circ$  (tačka B na sl. 2.14). Ukoliko su naponi zatezanja veći od čvrstoće stijenske mase na zatezanje doći će do pojave prslina. Ako oko kružnog otvora opišemo elipsu, kao što je prikazano na sl. 2.14, može se sračunati veći radijus elipse iz uslova da tangenti napon u tački B' bude jednak nuli (zatezanje se javlja ispod tačke B', a pritisak iznad tačke B'). Koristeći ranije izvdene izraze za napone oko elipsastog otvora dobija se:



**Sl. 2.14.** Pojava prslina usljed zatezanja

pa se nakon sređivanja dobija zona moguće pojave prslina:

$$\Delta a \geq a \frac{1-3\lambda}{2\lambda}.$$



**2.4. Sekundarno ravno stanje napona oko kružnog otvora sa zonom granične ravnoteže**  
(Kastnerovo rješenje, 1949)

Da bi došlo do jednačina koje opisuju stanje pri pojavi zone granične ravnoteže, neophono je postaviti jednačine koje važe u zoni plastične ravnoteže i izvan ove zone tj. u elastičnoj oblasti. Pri tome je neophono ispuniti uslove loma (plastifikacije) i granične uslove.

**I. Na koturi iskopa nema reaktivnih sila ( $P_e=0$ )  
(nepodgrađen iskop, iskop bez podgrade)**

**A. Uslovi ravnoteže**

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0$$

**B. Ulov loma (Coulomb-Mohr-a)**

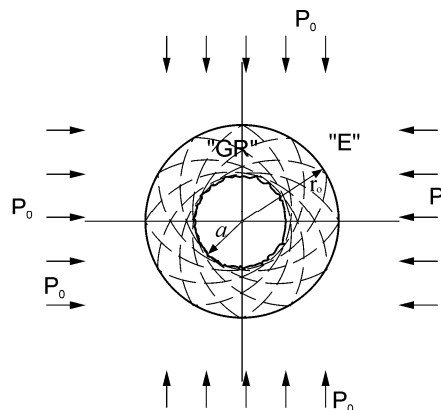
$$\sigma_\theta (1 - \sin \bar{\phi}) = \sigma_r (1 + \sin \bar{\phi})$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{2\bar{c} \cos \bar{\phi}}{1 - \sin \bar{\phi}} \quad \text{- jednakost čvrstoća}$$

$$\bar{\beta}_z = \bar{c} \operatorname{ctg} \bar{\phi} \quad \text{- čvrstoća na zatezanje}$$

**C. Konturni uslovi**

za  $r=a$ :  $\sigma_\theta = \bar{\sigma}_c$ ;  $\sigma_r = 0$ ;



**Sl. 2.15.** Zona granične ravnoteže sa slobodnom konturom iskopa

- "GR"**  $a \leq r \leq r_0$  zona plastifikacije stijenska masa u stanju loma, tj. granične ravnoteže
- "E"**  $r_0 \leq r$  zona u elastičnom stanju

**RJEŠENJE:**

Za  $a < r < r_0$  (u zoni granične ravnoteže)

$$\sigma_r^s = \frac{\bar{\sigma}_c}{\chi - 1} \left[ \left( \frac{r}{a} \right)^{\chi - 1} - 1 \right] \quad \text{gdje je } \chi = \frac{1 + \sin \bar{\phi}}{1 - \sin \bar{\phi}}$$

$$\sigma_\theta^s = \frac{\bar{\sigma}_c}{\chi - 1} \left[ \chi \left( \frac{r}{a} \right)^{\chi - 1} - 1 \right] \quad \bar{\sigma}_c = \frac{2\bar{c} \cos \bar{\phi}}{1 - \sin \bar{\phi}} \quad \text{- jednoaksijalna čvrst.}$$

Ovdje su sa  $\bar{\sigma}_c$  i  $\bar{\phi}$  itd. označene veličine koje se odnose na "stijensku masu" a ne na uzorak – monolit.

Za  $r > r_0$  (u zoni elastičnosti)

$$\text{za } \sigma_r = \sigma_h = P_0 \quad (\lambda = 1.0)$$

$$\sigma_r^e = P_0 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad \sigma_\theta^e = P_0 \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right)$$

Izrazi za elastičnu zonu proizilaze iz Lamé-ovog rješenja za debelu cijev.

Definisanje granice zone granične ravnoteže (granice plastičnosti)  $r_0$

Za  $r = r_0$

$$\sigma_r \Rightarrow P_0 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r_0^2} \right) + \sigma_r^{(r_0)} \frac{r_0^2}{r_0^2} = \frac{\bar{\sigma}_c}{\chi - 1} \left[ \left( \frac{r_0}{a} \right)^{\chi - 1} - 1 \right]$$

$$\sigma_\theta \Rightarrow P_0 \left( 1 + \frac{r_0^2}{r_0^2} \right) - \sigma_r^{(r_0)} \frac{r_0^2}{r_0^2} = \frac{\bar{\sigma}_c}{\chi - 1} = \frac{\bar{\sigma}_c}{\chi - 1} \left[ \chi \left( \frac{r_0}{a} \right)^{\chi - 1} \right]$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (\sigma_r^{(r_0)}, r_0)$$

Nakon rješavanja se dobija:

$$r_0 = a \left[ \frac{2[P_0(\chi - 1) + \bar{\sigma}_c]}{(\chi + 1)\bar{\sigma}_c} \right]^{\frac{1}{\chi - 1}}$$

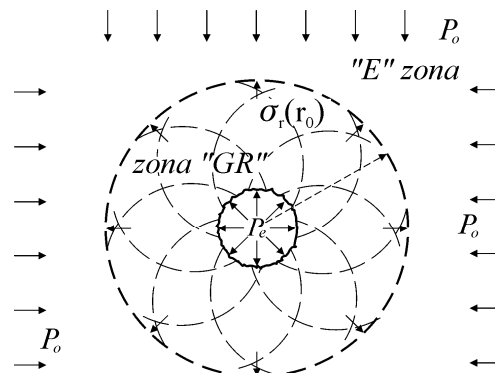
## II. Na koturi iskopa postoji reaktivni otpor podgrade ( $Pe=0$ ) (podgrađen iskop, iskop sa podgradom)

### RJEŠENJE:

Za  $a < r < r_0$  (u zoni granične ravnoteže)

$$\sigma_r^g = P_e \left( \frac{r}{a} \right)^{\chi - 1}$$

$$\sigma_\theta^g = \chi P_e \left( \frac{r}{a} \right)^{\chi - 1}$$



Za  $r > r_0$  (u zoni elastičnosti)

- važe iste jednačine iz prethodnog slučaja

SI. 2.16 Zona granične ravnoteže sa reaktivnim pritiskom  $p$  na konturi iskopa

Definisanje granice zone granične ravnoteže (granice plastinosti)  $r_0$

**Za  $r = r_0$**

$$\sigma_\theta \Rightarrow 2P_0 - \sigma_r(r_0) = \sigma_{\theta(r_0)}^e$$

$$\sigma_r \Rightarrow \sigma_{r(r_0)} = P_e \left( \frac{r_0}{a} \right)^{\chi-1} + \frac{\bar{\sigma}_c}{\chi-1} \left[ \left( \frac{r_0}{a} \right)^{\chi-1} \right]$$

Iz uslova Coulomb-Mohr-a (koji se ispunjava za slučaj  $c=0$ ) pri  $r=r_0$  slijedi:

**za**  $\sigma_1 = \sigma_\theta, \quad \sigma_3 = \sigma_r$

$$\sigma_\theta = \sigma_r \chi + \bar{\sigma}_c, \quad \text{odnosno}$$

$$2P_0 - \sigma_r(r_0) = \chi P_e \left( \frac{r_0}{a} \right)^{\chi-1} + \bar{\sigma}_c$$

$$2P_0 = (\chi + 1) P_e \left( \frac{r_0}{a} \right)^{\chi-1} + \bar{\sigma}_c, \text{ nakon sređivanja}$$

Slijedi:

$$r_0 = a \left[ \frac{2P_0 - \bar{\sigma}_c}{(1 + \chi)P_e} \right]^{\frac{1}{\chi-1}}$$

## 2.5. Metoda za grafičko određivanje zone granične ravnoteže ( $r_0$ )

Zonu granične ravnoteže je moguće odrediti grafički uz uslov da je:

- materijal elastičan i izotropan;
- stanje primarnih napona izotropno, tj. da je  $P_v^0 = P_h^0$ ;
- poznati su paramteri smičuće otpornosti  $\phi$  i  $c$ .

Uz naprijed navedene uslove tangenti sekundarni napon je veći glavni napon  $\sigma_t = \sigma_1$ , a radijalni sekundarni napon je manji glavni normalni napon  $\sigma_r = \sigma_3$ . Ove činjenice nam dozvoljavaju da primjenimo sljedeću grafičku proceduru za određivanje zone granične ravnoteže, koja se može pratiti na *sl. 2.17*.

1. U pogodnoj razmjeri grafički predstavimo tangenti i radijalni sekundarni napon oko kružnog otvora;
2. Na nekom rastojanju od centra otvora u vertikalnom pravcu iscrtamo Mor-Culonov uslov loma;

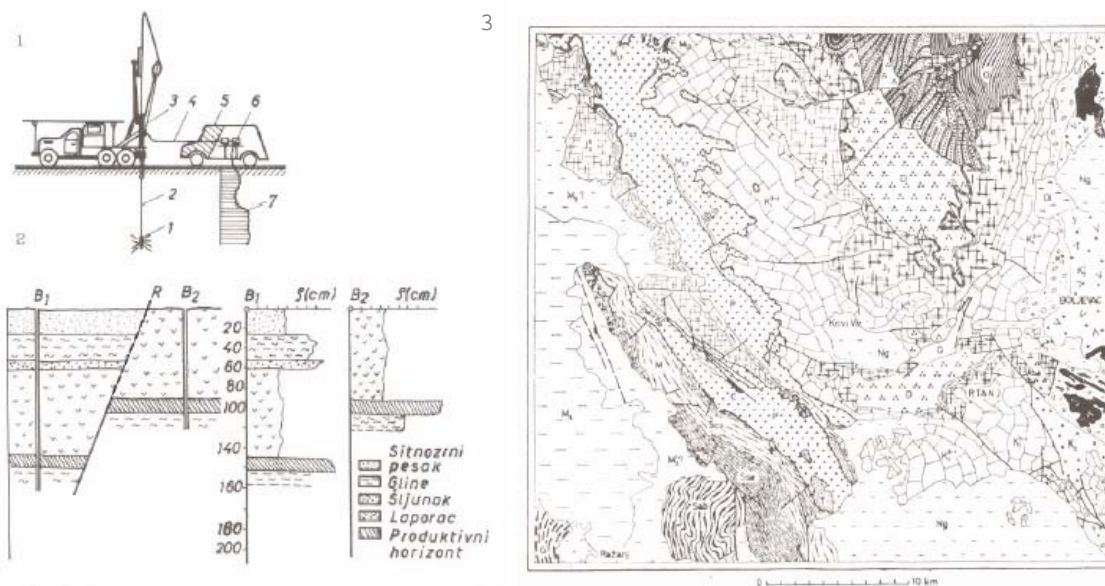


### 3. GEOTEHNIČKE OSNOVE ZA PROJEKTOVANJE TUNELA

#### 3.1. Geološke i inženjersko geološke osnove za formiranje modela za dimenzionisanje podzemnih konstrukcija (istražni radovi, geološko-inženjerske karte, prognozni inženjersko-geološki profili, definisanje kvazihomogenih zona)

##### 3.1.1. Istražni radovi

U cilju definisanja geološke građe terena kroz koji treba da se izvrši iskop tunela ili podzemnog objekta izvode se istražni radovi. Prije početka istražnih radova izrađuje se projekat istražnih radova na osnovu kog se izvode istražni radovi. Istražni radovi obuhvataju obilazak terena, kartiranje, izvođenje istražnih bušotina, galerija, raskopa itd. Rezultati istraživanja se interpretiraju kroz geološke karte, geološke profile, zapisnike sondažnih bušenja i sl.

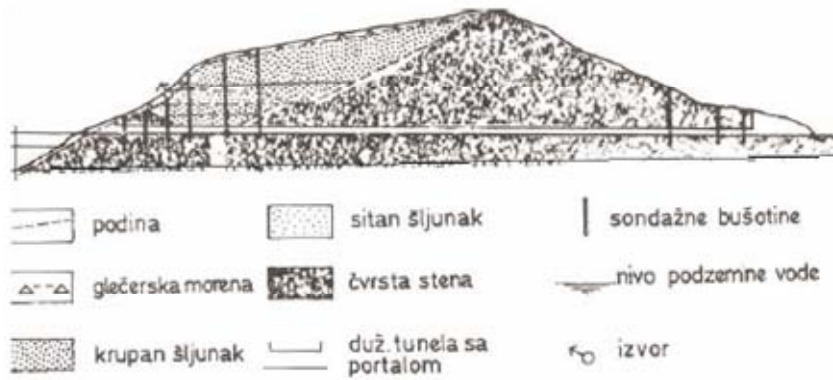


SI. 3.1. Istražno bušenje (1), geološki profil i zapisnik istražnog bušenja (2) i geološka karta (3)

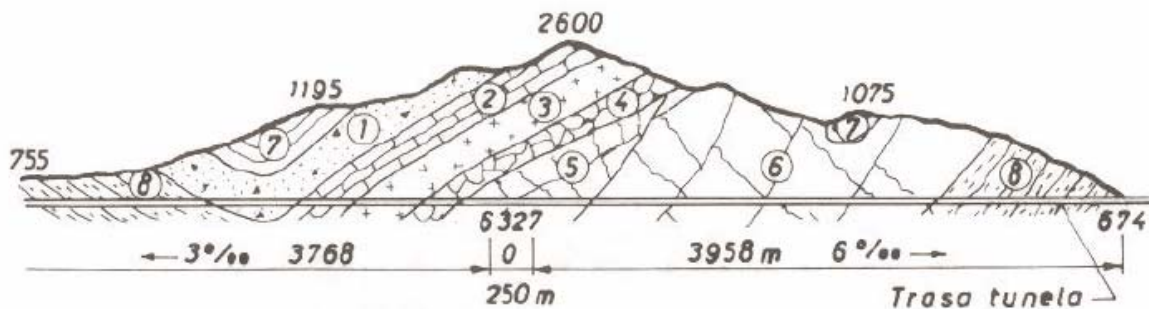
##### 3.1.2. Inženjersko geološke podloge

Geološke podloge sadrže podatke o vrstama stijena koje se nalaze na određenom području, genezi, prostornom položaju, pružanju slojeva, vodopropusljivosti itd. koje se prezentuju kroz pisane izvještaje, geološke karte i prognozne geološke profile.

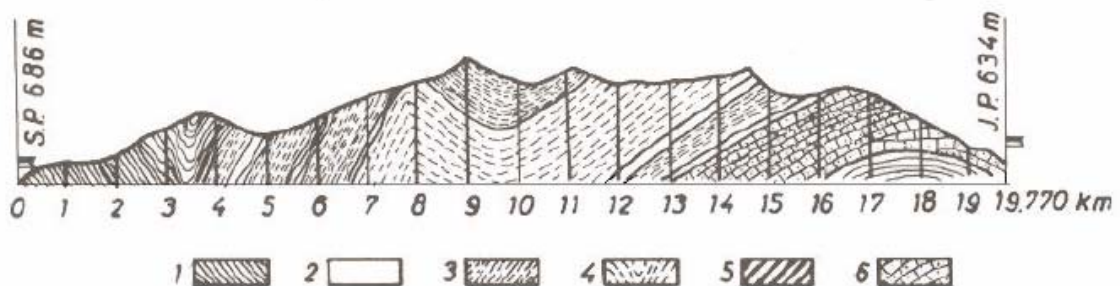
Za projektovanje podzemnih objekta pored prezentacije geološke situacije izrađuju se posebno i inženjersko geološke karte, prognozni profili i tabele u kojima se prezentuju podaci bitni za projektovanje i građenje objekta. Na inženjersko geološkim izvještajima (karte, profili, tabele) prezentuju se mehaničke osobine pojedinih grupa stijena koje egzistiraju na predmetnoj oblasti.



SI.3.2. Geološki profil sa sondažnim bušotinama



SI.3.3. Geološki profil terena



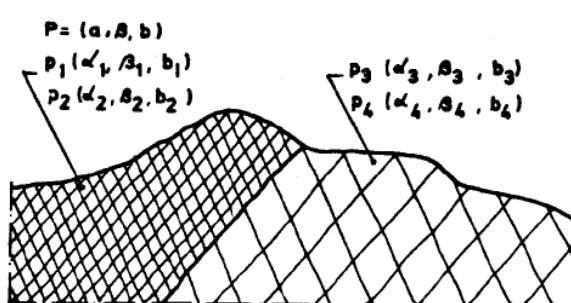
SI.3.4. Inženjersko geološki profil terena

Jedan od osnovnih ciljeva inženjersko-geološke analize je definisanje zona sa sličnim mehaničkim ponašanjem i definisanje opsega i prosječnih mehaničkih parametara koje imaju date zone. U inženjersko-geološkom profilu se izdvajaju zone stijena sa sličnim mehaničkim ponašanjem kako bi se projektantu tunela omogućilo da: pregledno uoči pojedine zone sličnih karakteristika, skup različitih stijena svede na adekvatan broj i omogući racionalan pristup projektovanju. Izdvajanjem ograničenog broja kvazihomogenih zona (u pogledu mehaničkih karakteristika) sprovodi se i ograničen broj statičkih proračuna, različitih dimenzija podgrade, tehnologije iskopa itd.

### 3.1.3. Definisanje kvazihomogenih zona po parametru ispucalosti

Na osnovu istraživanja pukotina, kao elemenata ispucalosti i na osnovu utvrđenih klasifikacija (opštih i relativnih) pristupa se utvrđivanju kvazihomogenih zona za koje se smatra da su na isti način ispucale. Najbitniji faktori za utvrđivanje prostornog položaja su elementi pada (azimut i padni ugao) i srednje međusobno rastojanje pukotina. Za određivanje kvazihomogenih zona koriste se i geofizičke metode.

Kvantitativni izraz učestalosti pukotina (prema *Stini*-ju) je koeficijent ispucalosti po kojim se podrazumjeva broj presjeka pukotina na dužni metar mjerene osnove:



$$k = \frac{n}{l}$$

gdje su:

$k$  - linearni koef. ispucalosti;

$n$  - broj presjeka pukotina;

$l$  - dužina mjerne osnove;

#### Kategorizacija diskontinuiteta:

A) GENETSKA (geološka):

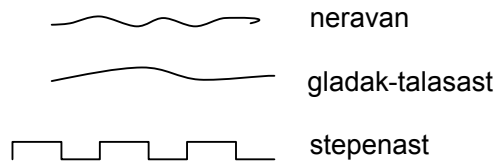
- **pri formiranju (singenetska)** lučenje, hlađenje (sušenje), savijanje, smicanje, sabijanje itd.
- **naknadno (post-genetsko)** posledica naponske promjene: rastrećenje, smicanje, izmjena forme terena, erozija vode, rastvaranje, itd.

B) GEOMETRIJSKA: položaj u prostoru (pružanje i pad). (Vidi dio **3.2.**)

C) GEOTEHNIČKA:

- **učestanost:** linijska, površinska, zapreminska;  
*razmak:* <6cm vrlo učestale; 6-20cm učestano; 60-200cm razmaknuto;
- **kontinualnost:** procenat "mostova" – prekida  
 $l < 3m$  neznatna;  $l = 3-10m$  osrednja;  $l > 10m$  znatna;
- **otvorenost:** 0.1 – 0.5mm stisnute prsline  
0.5 – 2.5mm pukotine  
2.5 – 10mm otvorene pukotine  
1cm – 100cm zjapeće pukotine  
>100cm kaverne

- **otpornost na smicanje:** stepen-talasaste-rapave površine: neravne, uglačane, razdvojene ispunom

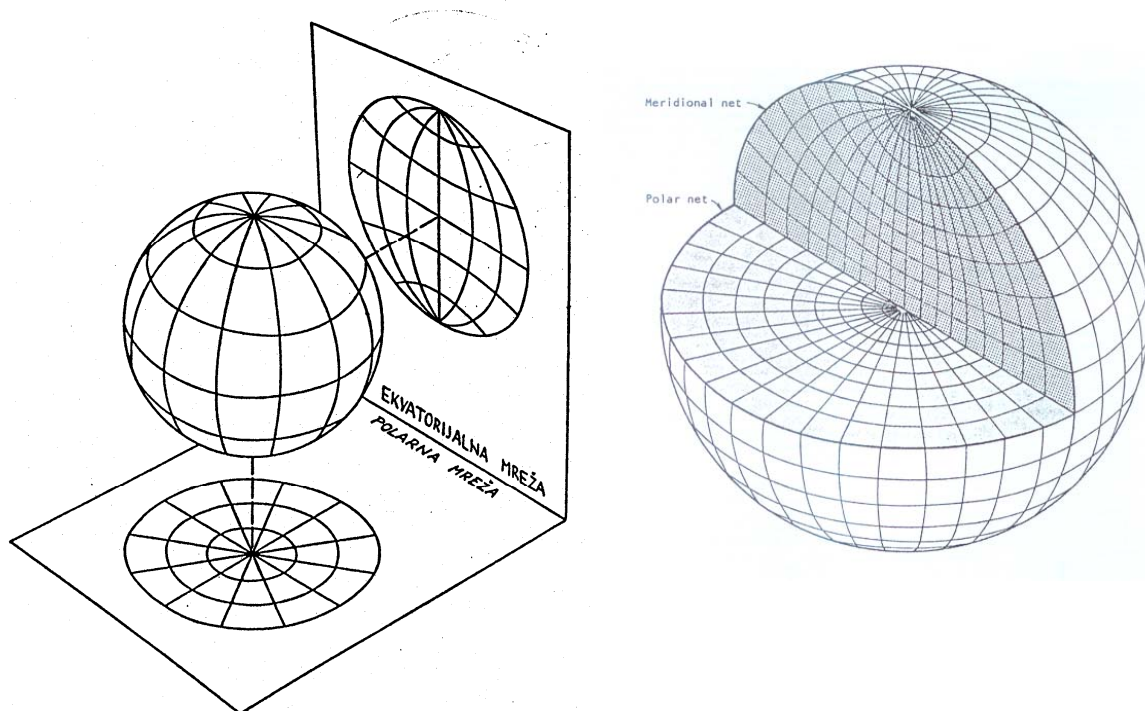


### 3.2. Grafička prezentacija geoloških podataka

(Korišćenje stereografske projekcije za prikazivanje slojevitosti stijenske mase)

Koliko će inženjer efektivno koristiti geološke podatke zavisi od njegove sposobnosti da ih razumije, sistematizuje i da ih primijeni na projekat. Komunikacija između geologa i inženjera je posebno značajna kada na stabilnost stijenske mase, koja se nalazi oko podzemnog iskopa, bitno utiču diskontinuiteti kao što su: površi slojevitosti, dobro razvijeni spojevi (pukotine) ili rasjedi. U takvim slučajevima je trodimenzionalni geometrijski odnos između diskontinuiteta i kalote i zidova iskopa veoma bitan pošto ovaj odnos kontroliše pad i klizanje blokova.

Većina geologa je upoznata sa korištenjem sfernih projekcija za geometrijsko predstavljnje diskontinuiteta i drugih geoloških podataka, ali dosta građevinskih inženjera nije upoznato sa ovom tehnikom. U ovom dijelu se izlažu osnovni principi i korištenje stereografskih projekcija i aplikacija na određivanje položaja diskontinuiteta u prostoru.

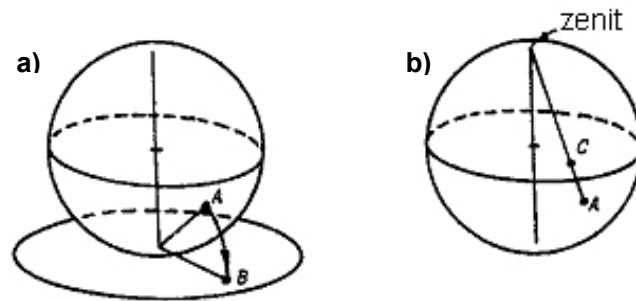


SI.3.6. Sfera sa polarnom i meridijalnom mrežom



### 3.2.1. Projekcije jednakih površina i jednakih uglova

Slika 3.6. pokazuje sferu sa jednom uklonjenom četvrtinom i sa meridijalnim i polarnim mrežama koje su projektovane na izložene vertikalne i horizontalne strane. Postoje dvije vrste projekcije koje se koriste da bi se formirale meridijalne i polarne mreže i ovdje su date projekcije i jednakih površina i uglova. Ove projekcije su opisane u daljem tekstu.



Sl.3.7. Projekcija jednakih površina (a) i projekcija jednakih uglova (b)

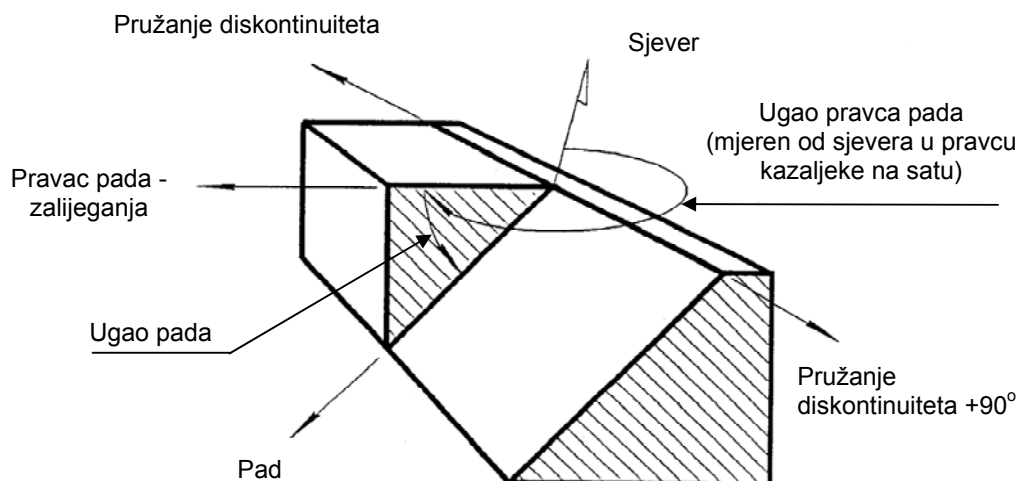
**Projekcija jednakih površina** takođe je poznata pod nazivom Lambert ili Šmit projekcija, i formira se pomoću metode koja je prikazana na datoj okvirnoj skici, sl.3.7.a. Tačka A na površini sfere se projektuje u tačku B pokrećući je u obliku luka čiji se centar nalazi u tački dodira sfere i horizontalne površine na kojoj ona stoji. Ako se ovaj proces ponavlja za veliki broj tačaka, definisanih presjekom jednako raspoređenih podužnih i poprečnih krugova na površini sfere, biće formirana jednaka mrežna oblast. Ova mreža ima veći prečnik od sfere i smanjuje se da bi odgovarao datoj sferi, poluprečnik svake tačke na mreži se smanjuje za  $1/\sqrt{2}$ .

**Projekcija jednakih uglova**, takođe poznata kao Stereografička ili Vulfova projekcija, se dobija metodom koja je prikazana u donjoj okvirnoj skici sl.3.7.b. Projekcija C tačke A na površini sfere je definisana tačkom u kojoj linija povučena od tačke A do zenita presjeca horizontalnu ravan postavljenu kroz centar sfere. Zenit je tačka u kojoj vertikalna osa prodire kroz sferu.

Objе vrste projekcije se koriste za analizu prostora položaja diskontinuiteta. Uopšteno govoreći, geolozi više vole projekciju jednakih površina, jer kao što samo ime govori, mreža je podijeljena na jedinice jednake oblasti, a ona omogućava statističku interpretaciju konstruktivnih podataka. Inženjeri više vole projekciju jednakih uglova jer je geometrijska izrada potrebna za rješavanje inženjerskih problema, koji su jednostavniji i tačniji na ovoj projekciji nego na projekciju jednakih površina. Autori koji su se intezivno bavili brzinom, prednostima i tačnošću statističke interpretacije diskontinuiteta i geometrijskom izradom koristeći obje vrste projekcije uvjerali su se da za primjenu ne postoji praktične prednosti izbora jedne vrste projekcije u odnosu na drugu. Prednosti i mane se balansiraju sa korištenjem ovih projekcija kada se mreže više koriste za opšte rješenje problema nego za analizu pojedinog dijela tog problema.

### 3.2.2. Elementi koji definišu diskontinuitet – definicija pojmova

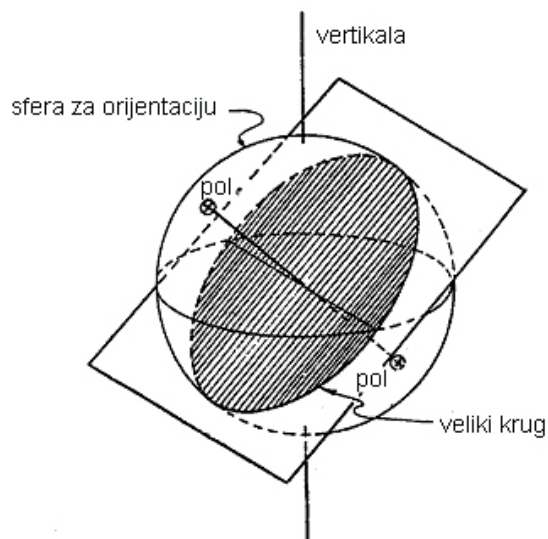
Ravan diskontinuiteta u prostoru je definisana pravcem pružanja i padom (padnom pravom). Pravac pružanja se definiše u odnosu na sjever, u pravcu kretanja kazaljke na satu. Pad ili zalijeganje se definiše uglom koji zaklapa horizontala sa ravni diskontinuiteta, kako je prikazano na slici 3.8.



SI.3.8. Geometrijski elementi diskontinuiteta

### 3.2.3. Stereografske projekcije ravni i njenog pola

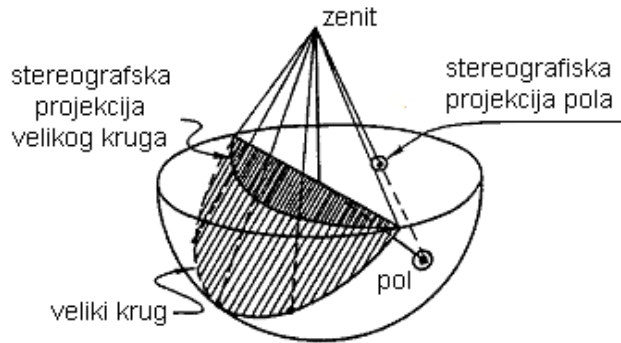
Zamislite sferu koja može da se pokreće u prostoru sa centrom u nagnutoj ravni kao što je to prikazano na slici 3.9. Presjek ravni i površine sfere je veliki krug koji je osjenčen na slici. Linija koja prolazi kroz centar sfere je upravna na ravan, probija sferu u dvije dijametralne tačke koje se zovu polovi velikog kruga (koji predstavlja ravan).



SI. 3.9. Veliki krug sa polovima koji definišu nagib i orijentaciju kose ravni

Zbog istih informacija koje se pojavljuju na gornjem i donjem dijelu sfere, potrebno je koristiti samo jednu hemisferu za prestavljanje diskontinuiteta. U inženjerskoj geologiji, obično se koristi donja pomoćna hemisfera.

Slika 3.10. pokazuje metodu izrade stereografske projekcije velikog kruga i njegov pol. Slika 3.11. daje prikaz ovih projekcija. Inklinacija (nagib) i orijentacija kose ravni je definisana isključivo velikim krugom i polom te ravni. Polovi su obično kartirani kada se uobičajeno sakupljaju geološki podaci na terenu (kao što je to prikazano kasnije u ovom poglavlju) i odgovarajući veliki krugovi prilikom analiziranja podataka u inženjerske svrhe (stabilnost blokova sklonih ispadanju, i sl).



**Sl. 3.10:** Stereografska projekcija velikog kruga sa polom na horizontalnu ravan donje pomoćne hemisfere



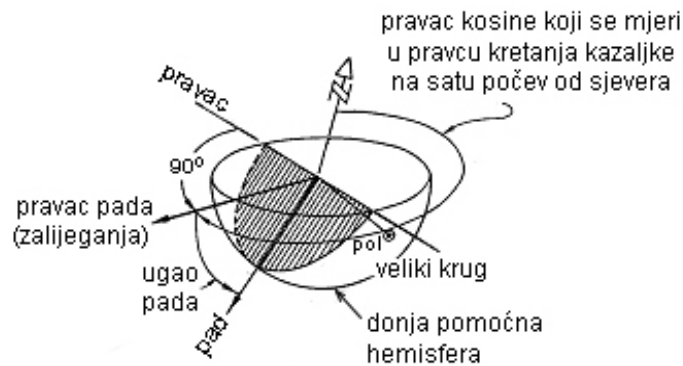
**Sl. 3.11.** Stereografska projekcija velikog kruga i njegovog pola

### 3.2.4. Prikaz geoloških termina

Kosa "geološka" ravan je definisana svojim nagibom ka horizontali i svojom orijentacijom prema sjeveru, što se može definisati pružanjem i nagibom pravca ravni. Odnos između ovih pojmova prikazan je na okvirnoj skici *sl. 3.8.* do *sl. 3.11.*

Pružanje ravni je pravac presjeka date ravni i horizontalne površine, a većina geologa je koristi radi definisanja orijentacije ravni. Da bi se eliminisale sve moguće nejasnoće kada se koristi

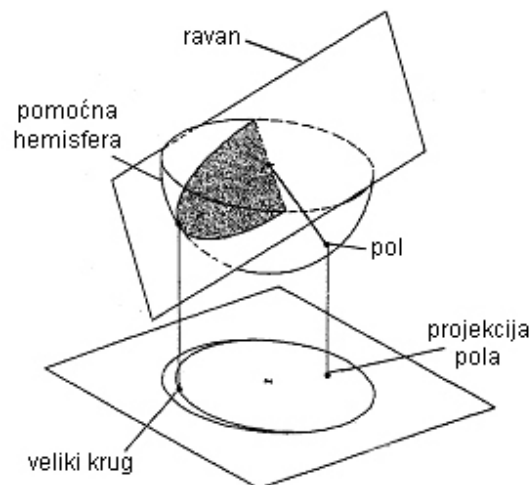
prostiranje, neophodno je definisati pravac u kome ravan ima pad. Stoga je ravan u potpunosti definisana ako je zabilježena sa prostiranjem od N 30 W i sa padom 20 SW. S druge strane, ako je zabilježena sa padom od 20°, nije sasvim jasno da li je pad u pravcu jug-zapad ili sjever-istok. Geolozi koriste ustaljeni način za eliminaciju ovog problema koristeći zalijeganje. Geolozi treba da koriste metode sa kojim su najviše upoznati (»familijarni«), ali treba da vode računa da uključe informacije o korišćenju metodi, tako da bilo ko da radi sa tim podacima zna koja je metoda (opcija) korištena.



**Sl. 3.12.** Definisane pojmove koji se koriste pri geometrijskom definisanju kose ravni pomoću donje hemisfere

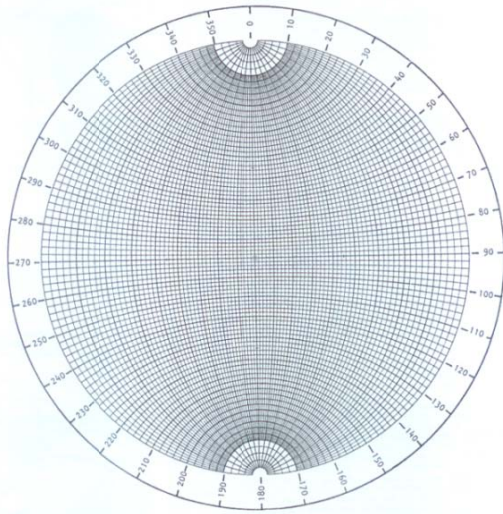
Slika 3.12. prikazuje nagib, pravac nagiba i pravilo prostiranja koje se koristi vezano za donju pomoćnu hemisferu stereografske projekcije. Treba zapaziti da se pravac nagiba uvijek mjeri u pravcu kretanja kazaljke na satu počevši od sjevera i da je linija prostiranja pod uglom 90° u odnosu na pravac nagiba ravni.

Geotehnički inženjeri, posebno oni koji stalno koriste kompjuter za analizu, nastoje da koriste kosi pravac prije nego pružanje kao način definisanja orijentacije ravni. Ukoliko su kosi pravac i ravna zabilježeni kao 240/20, nema zabune oko orijentacije i nagiba te ravni, a ovo bilježenje je konciznije nego za pružanje i pad - ovo je važan podatak kada kompjuter obrađuje velike količine geoloških podataka.

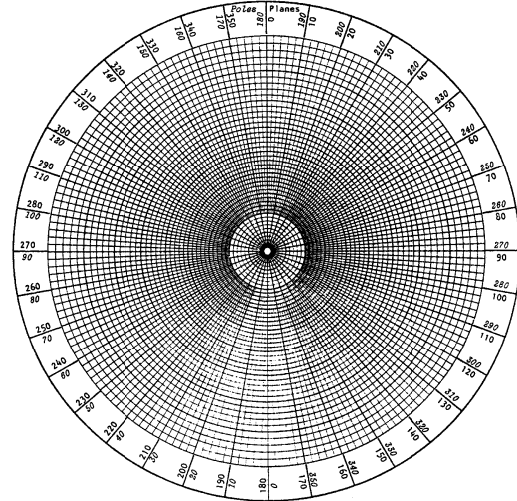


**Sl. 3.13.** Prikazivanje kose ravni (diskontinuiteta) projekcijom pola

U cilju što efikasnijeg rada na terenu geolozi za zapisivanje podataka o geometriskom položaju diskontinuiteta koriste samo projekciju pola ravni (sl. 3.13) upisujući na već pripremljene polarne ili meridijalne mreže (sl. 3.14.) samo tačku projekcije pola. Ovako upisana tačka projekcije pola u potpunosti definiše položaj diskontinuiteta u prostoru. Na jednoj podlozi se vrši upisivanje podataka o čitavom setu diskontinuiteta koji se javljaju na jednom lokalitetu, i kasnije se podaci statistički obrađuju i dobijaju se prosječne vrijednosti pružanja i pada za svaki set diskontinuiteta posebno.



a) Meridijalna stereografska mreža

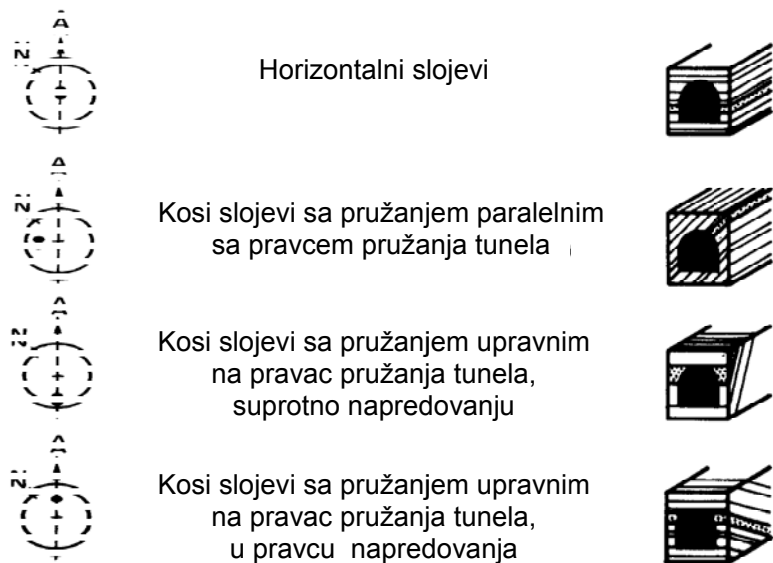


b) Polarna stereografska mreža

SI. 3.14. Pripremljene stereografska mreže za rad na terenu

### 3.2.5. Položaj projekcije pola diskontinuiteta (slojeva) u odnosu na pravac pružanja tunela

Na stabilnost tunelskog iskopa uticaj imaju diskontinuiteti, posebno položaj diskontinuiteta u odnosu na pravac pružanja tunela (detaljnije opisano u dijelu 3.4). Na sl. 3.14. dato je nekoliko primjera orijentacije diskontinuiteta i pravca pružanja tunela (za prikaz polova ovdje je korišćena gornja hemisfera).



SI. 3.14. Primjeri orijentacije diskontinuiteta i pravca pružanja tunela

### 3.3. Tipovi tunelskog iskopa prema GN 206

Prema uslovima - težini izrade tj. geološkom sastavu (GN 206) tuneli se dijele na: dobre, srednje teške, teške i veoma teške. U narednom tekstu se bliže definišu geološki uslovi koji karakterišu pojedine tipove tunelskog iskopa.

<b>Dobre</b>	<p>U dobre uslove spadaju tuneli koji se izvode u masivnim, debelo uslojenim stijenskim masama velike čvrstoće bez pukotina, dakle u materijalu koji u toku iskopa ne iziskuje podgrađivanje.</p> <p>Ovakvi stijenski materijali su: bazalt, dijabaz, gabro, granit, kvarc, diorit, gnajs, porfirit, andezit.</p>
<b>Srednje teške</b>	<p>U srednje teške uslove spadaju radovi koji se izvode u stijenskom materijalu koji je raspucan i ostećen i ima manju čvrstoću, pa zbog toga se podzemni otvori moraju osigurati lakom podgradom.</p> <p>U grupu stijena ove kategorije spadaju sve eruptivne, sedimentne i metamorfne stijene koje su u procesu raspadanja, zatim meki i glinoviti pješčari, laporci, škriljci, laporovita glina, dobro vezan i zbijen pijesak, les, tuf i drugi slični stijenski materijali.</p> <p>Obično se u ovakvom stijenskom materijalu pojavljuju znatni vertikalni a izuzetno i bočni podzemni pritisci, što iziskuje sistematsko postavljanje podgrade.</p>
<b>Teške</b>	<p>U teške uslove spadaju radovi pri izradi podzemnih prostorija koji se izvode u stijenama koje su duboko zahvaćene procesom raspadanja i kod kojih zbog visokog stepena degradacije stijenske mase postoji mogućnost pojave rušenja većih masa; zatim u stijenama koje su ispreturane, zdrobljene i iskomadane; slabo vezanim konglomeratima, škriljcima, filitima, argilošistima i drugim sličnim stijenama.</p> <p>U ovakvim uslovima pojavljuju se veoma snažni podzemni pritisci koji iziskuju oprezan rad i čvrstu podgradu.</p>
<b>Veoma teške</b>	<p>U veoma teške uslove spadaju oni radovi koji se izvode u nevezanom i glinovitom stijenskom materijalu sa dosta vode, kao što su: pijesak, glina, sasvim raspadnuti škriljci, muljevit stijenski materijal i uopšte mek i plastičan stijenski materijal na koji nepovoljno utiču voda i vazduh.</p> <p>U ovakvim uslovima pojavljuju se veoma veliki podzemni pritisci, velika pokretljivost stijenske mase, priliv vode, što iziskuje da se otkopana šupljina mora veoma pažljivo i dobro podgraditi, a radovi izvoditi veoma oprezno.</p>

Važeća normativna klasifikacija tunelskih radova (sa površinom poprečnog presjeka iskopa koja nije veća od oko 25m<sup>2</sup>) data je u GN 206 i razvrstava tunelske radove iskopa i podgrađivanja u 4 kategorije i to:

- kategorija I-1 su "laki tunelski radovi" u vrlo čvrstim i žilavim stijenama ( $V_p > 6 \text{ km/s}$ ),
- kategorija I-2 su "laki tunelski radovi" u čvrstim stijenama ( $V_p = 4 \text{ do } 6 \text{ km/s}$ ),
- kategorija II su "srednje teški tunelski radovi" u polučvrstim stijenama ( $V_p = 2,5 \text{ do } 4 \text{ km/s}$ ),
- kategorija III su "teški tunelski radovi" u degradiranim, raspadnutim stijenama ( $V_p = 1 \text{ do } 2,5 \text{ km/s}$ ), i
- kategorija IV su "vrlo teški tunelski radovi" u mekom defomabilnom tlu ( $V_p < 1 \text{ km/s}$ ).

Na sličan način je u GN 200 (JUS U.E1.010) data klasifikacija iskopa na površini terena pri čemu kategorije I, II, i III označavaju tlo različite čvrstoće, kategorija IV označava prelaz sa tla na meku stijenu, a kategorije V, VI, i VII označavaju stijene različite čvrstoće.

U narednoj tabelije dat prikaz uporednih vrednosti rangiranja po navedenim sistemima, a usklađeno sa našim normama GN 206 i GN 200 ( $V_p$  je brzina podužnih seizmiških talasa koja se mjeri geofizičkim postupcima):

Kategorija prema		Rangiranje prema			Mjerodavna
GN 206	GN 200	RMR	Q	"f"	$V_p \text{ (km/h)}$
I - 1	VII	81 - 100	> 100	15 - 20	> 5
I - 2	VI	61 - 80	40 - 100	7 - 15	3 - 5
II	V - IV	41 - 60	10 - 40	2 - 7	2 - 3
III	III	21 - 40	1 - 10	0.9 - 2	1 - 2
IV	II-I	< 20	< 1	0.3 - 0.9	<1

### 3.4. Empirijske klasifikacije stijenskih masa

Empirijski pristup projektovanju podzemnih objekata u stijenskim masama temelji se na iskustvu stečenom prilikom realizacije predhodnih projekata u sličnim uslovima. Osnova takvog pristupa sastoji se u inženjerskoj klasifikaciji stijenskih masa, koja omogućava sistematizaciju stečenih iskustava u pogledu odnosa između kvaliteta stijenske mase, načina iskopa i podgrađivanja podzemnog objekta.

Do sada je razvijen veliki broj klasifikacija stijenske mase od kojih se kao preteča početkom XX vijeka pojavila klasifikacija *Protođakonova*, a u skladu sa današnjim načinom građenja podzemnih objekata, treba izdvojiti klasifikacije: *Deer-a* (1964), *Bieniawskog* (RMR, 1973) i *Bartonov Q* sistem (1974).

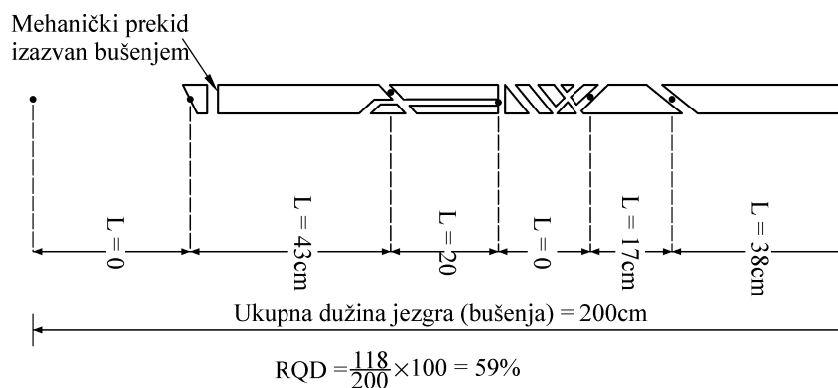
### 3.4.1. Klasifikacija Protođakonova

Od sistema rangiranja koji su bili neposredno povezani sa načinom određivanja "brdskih pritisaka" na podgradnu konstrukciju, kao najkonzistentnija se pokazala "opisna" podjela stijenskih masa po nivou kompetentnosti koju je oko 1910. godine uveo u praksu *prof. M. M. Protođakonov*. Ova podjela sadrži deset osnovnih kategorija, pri čemu svaka kategorija definiše koeficijent kvaliteta stene " $f$ ", čija se vrijednost kreće od 0.3 (za meko tlo) do 20 (za vrlo čvrstu stijenu).

Koeficijent  $f$  istovremeno određuje i veličinu "svoda rasterećenja", a time i pritiske na podgradnu konstrukciju. Vrijednost kvaliteta je definisana preko jenoaksijalne čvrstoće stijene  $f = \frac{\sigma_c}{10}$ , kada je  $\sigma_c$  izraženo u MPa.

### 3.4.2. Klasifikacija Deer-a

Jedan od prvih postupaka rangiranja stijenske mase na osnovu mjerenja, je tzv. RQD indeks kvaliteta stijenske mase (uveo ga je *J. Deer* 1964. god.) koji se dobija kao količnik zbira dijelova uzorka ("jezgra") stijenske mase po dužini većih od 10 cm (4 inča) i ukupne dužine uzorka stijene koji se dobija pri bušenju sa uzorkovanjem ("jezgrovanjem"), *sl. 3.15*.



**Sl. 3.15.** Primjer direktnog određivanja RQD

Ovim parametrom se dobija uvid u stepen ispucalosti stijene, odnosno stepen izdjeljenosti na pravcu bušenja i on se dosta uspješno primjenjuje za čvrste stijenske mase, ali se pokazao neprikladan za stijene male čvrstoće kao što su npr. lapori, glinci i sl.

### 3.4.3. Geomehnička klasifikacija ili RMR sistem

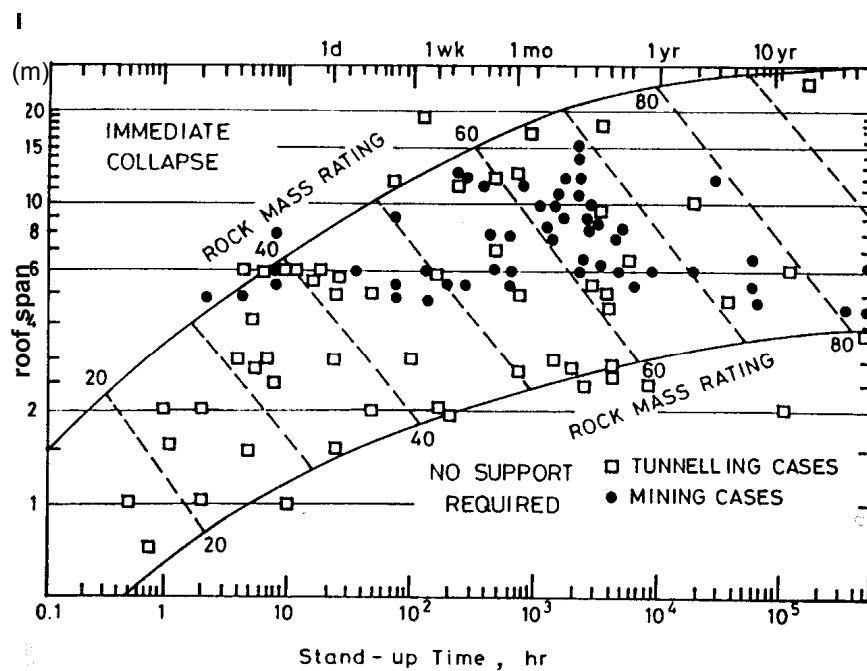
**Geomehničku klasifikaciju ili RMR sistem (Rock Mass Rating System)** razvio je *Bieniawski* (1973) za primjenu pri rješavanju inženjerskih problema u mehanici stijena. Klasifikacija se zasniva na bodovanju, pri čemu se različitim parametrima dodjeljuju različite numeričke vrijednosti u



zavisnosti od njihove važnosti za sveukupnu klasifikaciju stijenske mase. Klasifikacija sadrži sljedećih šest parametara koji se mogu dobiti bušenjem ili mjerenjem na terenu:

- jednoaksijalna pritisna čvrstoća stijenskog materijala,
- indeks kvaliteta jezgra (RQD),
- razmak diskontinuiteta (pukotina),
- svojstva diskontinuiteta (pukotina),
- stanje podzemne vode i
- orijentacija diskontinuiteta (pukotina).

Algebarski zbir bodova za svaki parametar u RMR klasifikaciji je manji ili jednak 100 i predstavlja parametar na osnovu kog se vrši rangiranje stijenske mase.



**Sl. 3.16.** Vrijeme stabilnosti stijenske mase u kaloti prema RMR klasifikaciji (na apscisi je vrijeme, a na ordinati je raspon otvora - dijametar ili rastojanje od čela iskopa do podgrade)

RMR klasifikacija je pogodnija za čvrste stijenske mase. Nedostatak klasifikacije je što ne sadrži parametar postojanosti stijenskog materijala. Postojanost je otpornost izložene površine stijenskog materijala na spoljnje uticaje kao što su promjena vlage, temperature i sl.

#### 3.4.4. Q - sistem

**Q - sistem** (Norveški geotehnički institut, Barton i dr. 1974.) predstavlja jednu od najkompletnijih klasifikacija stijenskih masa za podzemne radove. Temelji se na numeričkoj procjeni kvaliteta stijenske mase  $Q$  upotrebom šest parametara:

- $RQD$  - indeks kvaliteta jezgra (Deer, 1964),

- $J_n$  - broj skupova pukotina,
- $J_r$  - indeks hrapavosti pukotina,
- $J_a$  - indeks pukotinske ispunje,
- $J_w$  - faktor redukcije pukotinske vode i
- $SRF$  - faktor redukcije napona.

koji kombinovani daju kvalitet stijenske mase:

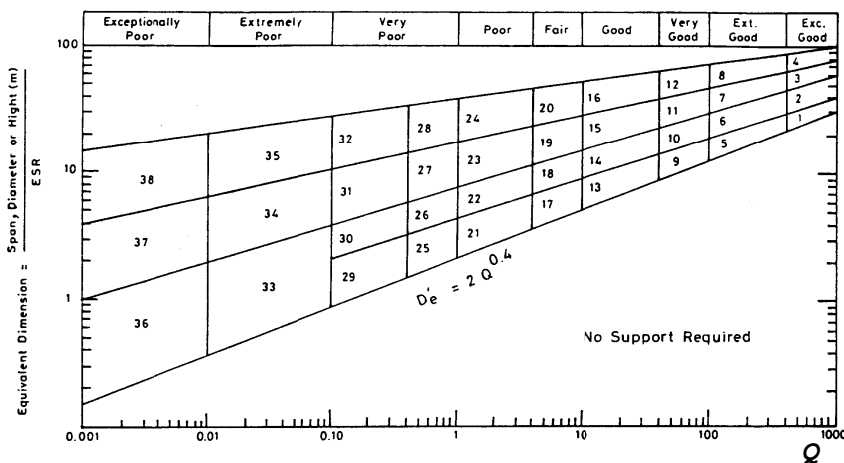
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Moguća vrijenost  $Q$  kreće se od 0.001 do 1000 i teoretski obuhvata više od 300 000 različitih geoloških situacija, od potpuno zgnječnog tla do stijenske mase bez pukotina.

Kvalitet stijenske mase  $Q$  moguće je iskoristiti za definisanje različitih parametra pri građenju i projektovanju objekta u stijenskoj masi. Tako je vrijednost  $Q$  povezana sa podgradom podzemne građevine tj. moguće definisati jačinu podgrade za datu stijensku masu preko ekvivalentne dimenzije iskopa:

$$\text{Ekvivalentna dimenzija iskopa} = \frac{\text{raspon, dijametar ili visina iskopa}}{\text{indeks podgrade (ESR)}}$$

$Q$  klasifikaciju je takođe moguće iskoristiti za definisanje čvrstoće stijenske mase (*Hoek i Brawn*, 1980, preko parametra  $s$  i  $m$ ) ili deformabilnosti stijenske mase (*Pereira 1983, Barton 1983*, i drugi).



**Sl. 3.17.** Zavisnost kvaliteta stijenske mase prema  $Q$ -klasifikaciji i potrebne podgradne konstrukcije

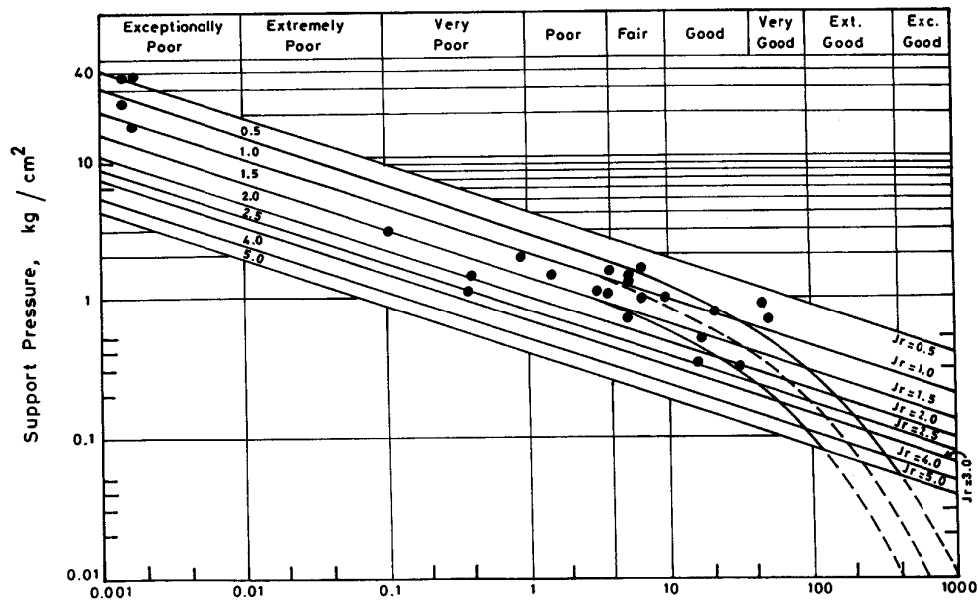
(u posebnim tabelama je opisana potrebna podgrada za svih 38 grupa stijena)

### 3.4.5. Definisanje podgradne konstrukcije prema geotehničkim klasifikacijama stijenske mase

Pored klasifikacije stijenske mase i procjene stabilnosti u toku iskopa, empirijske geotehničke kalasifikacije stijenske mase daju informacije i o potrebnoj podgradnoj konstrukciji (tipu i "jačini"). Pojedine klasifikacije vezu klase stijenske mase i potrebne podgradne konstrukcije za postizanje trajne ili privremene stabilnosti tunelskog otvora daju kroz tabele, a druge kroz odgovarajuće dijagrame.

Tako Q klasifikacija, vezu između vrijednosti  $Q$  i potrebne podgrade daje preko dijagama prikazanog na sl. 3.18. Dijagram koristi ekvivalentnu dimenziju iskopa i vrijednost RMR da se odredi podgrada preko 38 različitih kategorija stijene.

Takođe, preko Q klasifikacije je moguće doći do pritiska stijenske mase na podgradnu konstrukciju preko dijagrama prikazanog na slici 3.18, koji se može koristiti pri proračunu podgradne konstrukcije.



Sl. 3.8. Korelacija između pritiska na podgradu i kvaliteta stijenske mase  $Q$

Pored navedenih korelacija između kvaliteta (po Deer-u, RMR-u ili Q klasifikaciji) pojedine klasifikacije daju čitav niz tabela i dijagrama preko kojih se dolazi do korisnih podataka i parametara koji karakterišu stijensku masu. Treba istaći da se klasifikacioni sistemi stalno unapređuju i dopunjuju.

### 3.5. Povezanost tehnologije građenja i svojstava stijenske mase

Primjenjena tehnologija iskopa i pograđivanja značajno zavisi od vrste stijena i njenih mehaničkih karakteristika. Podjele stijena prema uslovima iskopa tunela izvršena kroz građevinske norme GN 206 i građevinske norme za iskop u otvorenom GN 200 dobrim dijelom mogu poslužiti kao osnova za planiranje tehnologije iskopa i izbor mašina. Tako se u zavisnosti od stijenske kategorije definisane u GN 206 i prema GN 200 mogu izdvojiti sledeći kategorije tunela:

Kategorija tunela	Podgrada	Način iskopa	Višak otkopa
<p><b>Laki tuneli</b></p> <p>u stijenama I kategorije (GN 206) ili VI i VII kategorije (GN 200)</p>	<p>mjestimična</p> <p>(uglavnom ograničena na fiksiranje nestabilnih blokova)</p>	<p>miniranje (VII) ili eventualno otkopne mašine (krtice) za VI kategoriju</p>	<p>pri miniranju 10 do 15%</p> <p><math>V_p = 4-7\text{km/s}</math></p>
<p><b>Srednje teški tuneli</b></p> <p>u stijenama II kategorije (GN 206) ili IV i V kategorije bez vode (GN 200)</p>	<p>sistematska</p> <p>(klasična betonska livena ili NATM – Nova Austriska Tunelska Metoda)</p>	<p>otkopne mašine (miniranje se izbjegava)</p>	<p>10 do 30%</p> <p><math>V_p = 2-4\text{km/s}</math></p>
<p><b>Teški tuneli</b></p> <p>u stijenama III kategorije (GN 206) ili IV i V karegorije sa vodom ili III kategorija bez vode (GN 200)</p>	<p>sistematska</p> <p>(klasična betonska livena, NATM ili montažna pri radu sa štitom)</p>	<p>otkopne mašine (miniranje se izbjegava)</p>	<p>10 do 30%</p> <p><math>V_p = 1.5-2\text{km/s}</math></p>
<p><b>Vrlo teški tuneli</b></p> <p>u stijenama IV kategorije (GN 206) ili I i II kategorije ili III kategorija sa vodom (GN200)</p>	<p>montažna</p>	<p>rad sa zatvorenim štitom</p>	<p>do 40% pri radu bez štita</p> <p><math>V_p = 0.2-1\text{km/s}</math></p>

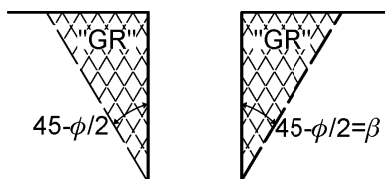
## 4. PRITISCI NA PODGRADNU KONSTRUKCIJU I DIMENZIONISANJE

### 4.1. Teorija rasteretnog svoda<sup>1</sup>

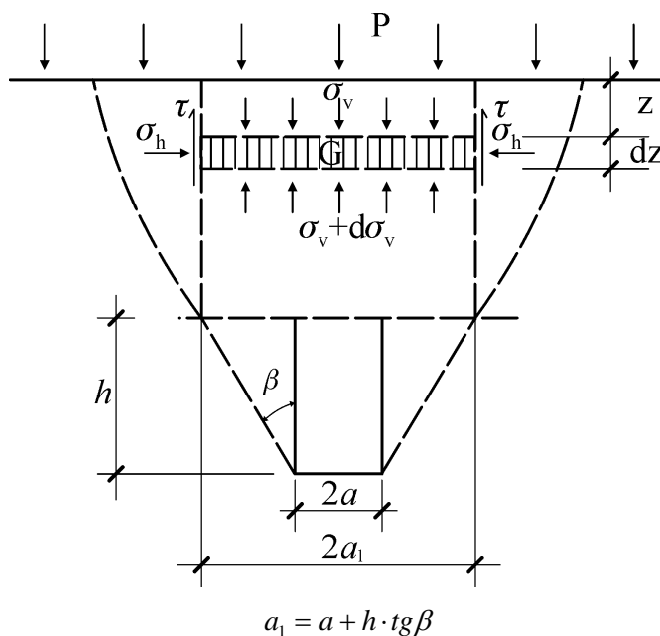
U razvoju teorija po kojim se računa pritisak stijenske mase na podgradnu konstrukciju tunela posebno mjesto zauzimaju teorije rasteretnog svoda. Suština ovih teorija je da se definiše zona stijenske mase oko i iznad tunela koja pod dejstvom sopstvene težine pritiska podgradnu konstrukciju, dok stijenska masa izvan ove zone nema uticaj na podgradnu konstrukciju. U daljem tekstu biće razmatrano Terzaghi-jevo rješenje i rastretni svod Protođakonova.

#### 4.1.1. Rješenje K. Terzaghi-ja, za rov sa nadslojem

Rov sa vertikalnim stranama i "aktivno" stanje ravnoteže predstavlja osnov Terzaghi-jevog pristupa, *sl. 4.1*. Terzaghi je razmatranje aktivnog stanja ravnoteže otvorenog rova proširio na rov sa nadslojem, čime se zapravo razmatra tunnel pravouganog poprečnog presjeka, kako je prikazano na *sl. 4.2*.



**Sl. 4.1.** Rov sa aktivnim klinovima u graničnoj ravnoteži



**Sl. 4.2.** Rov sa nadslojem i aktivnim klinovima u graničnoj ravnoteži

<sup>1</sup> Za detalje vezane za teoriju rasteretnih svodova čitalac se upućuje na: *TUNELI*, Branislav Popović, IGR "GRAĐEVINSKA KNJIGA" BROGRAD 1987, str.140-167.

Polazne pretpostavke za teoriju su:

$$\sigma_h = \lambda \sigma_v \quad \lambda = \text{const.}$$

$$\tau = \bar{c}' + \sigma_h \text{tg} \bar{\phi}' \quad \text{- Mor-Kulonov uslov loma}$$

Iz sume vertikalnih sila slijedi:

$$\Sigma V = 0 \quad \Rightarrow \quad 2a_1 \sigma_v + dz \gamma 2a_1 = (\sigma_v + d\sigma_v) 2a_1 + 2dz \tau$$

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma - \frac{\bar{c}'}{a_1} - \lambda \sigma_v \frac{\text{tg} \bar{\phi}'}{a_1}$$

smjenom:  $b_0 = \gamma - \frac{\bar{c}'}{a_1}$  i  $a_0 = -\lambda \frac{\text{tg} \bar{\phi}'}{a_1}$

slijedi:  $\frac{d\sigma_v}{dz} = b_0 + a_0 + \sigma_v$

Za  $z = 0, P = \sigma_v$ , rješenje:

$$\sigma_v = \frac{b_0}{a_0} (e^{a_0 z} - 1) + P e^{a_0 z} = \left( \frac{b_0}{a_0} + P \right) e^{a_0 z} - \frac{b_0}{a_0}$$

Kada na površini terena nema opterećenja tj.  $P = 0$  i kada je kohezija zanemariva  $\bar{c}' \cong 0$ , izraz se pojednostavljuje:

$$\sigma_v = \frac{a_1 \gamma}{\lambda \text{tg} \bar{\phi}'} \left( 1 - e^{-\lambda \frac{z}{a_1} \text{tg} \bar{\phi}'} \right)$$

Za tunele na velikoj dubini ustanovljeno je da vetikalni pritisak na tunelsku konstrukciju ne raste linearno sa dubinom, pa je Terzaghi-ueveo korekciju prethodno izvedenih izraza.

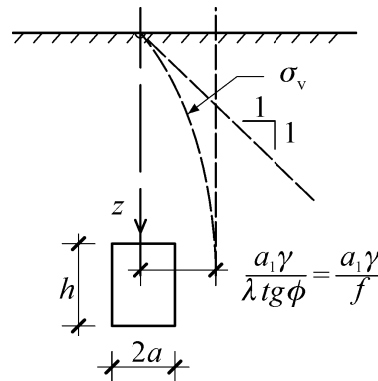
Za  $z \gg a_1$

$$\lambda \text{tg} \bar{\phi}' = \text{const} = f$$

$$\sigma_v = \frac{a_1 \gamma}{\lambda \text{tg} \bar{\phi}'} = \frac{a_1 \gamma}{f}$$

odnosno:

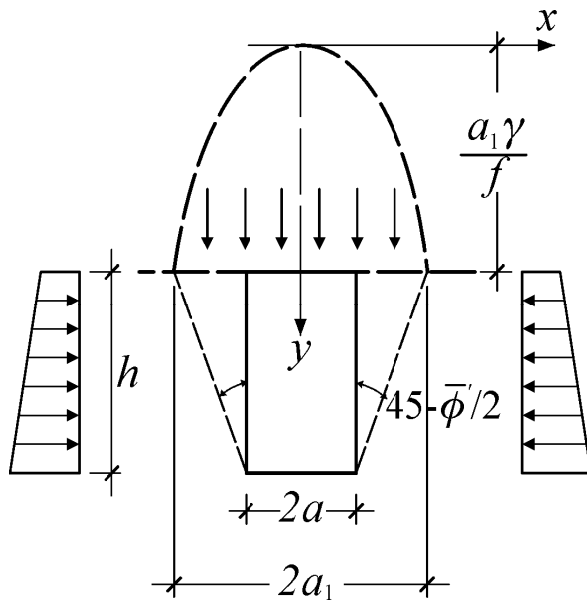
$$\sigma_v = \frac{a_1 \gamma - \bar{c}'}{\lambda \text{tg} \bar{\phi}'}$$



SI.4.3. Tunel na velikoj dubini

#### 4.1.2. Rješenje paraboličnog rasteretnog svoda po Protođakonovu (1908)

Rješenje Protođakovan važi za dubine  $z > (2 \text{ do } 3) a_1$ , kada se efekti površine terena zanemaruju. Drugim rječima, rješenje važi kada rasteretni svod ne dopire do površine terena.

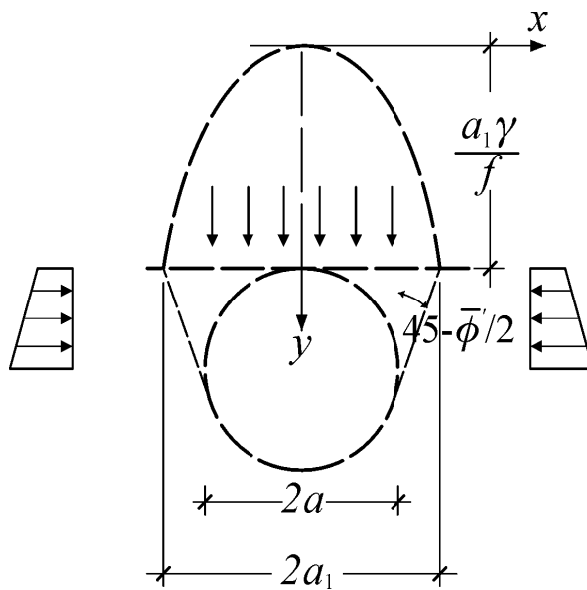


$$\sigma_v = \frac{a_1 \gamma}{f} - \frac{\gamma x^2}{a_1 f}$$

za zemljane mase  $f = \lambda \operatorname{tg} \bar{\phi}'$   
 $\lambda \cong 1.00$   
 $f \leq 1.00$

za stijene  $f = \frac{\beta_p (kP_a)}{10000} \quad f \geq 1.00$

Sl. 4.4. Dispozicija paraboličnog rasteretnog svoda za pravougaoni otvor



za kružni iskop:

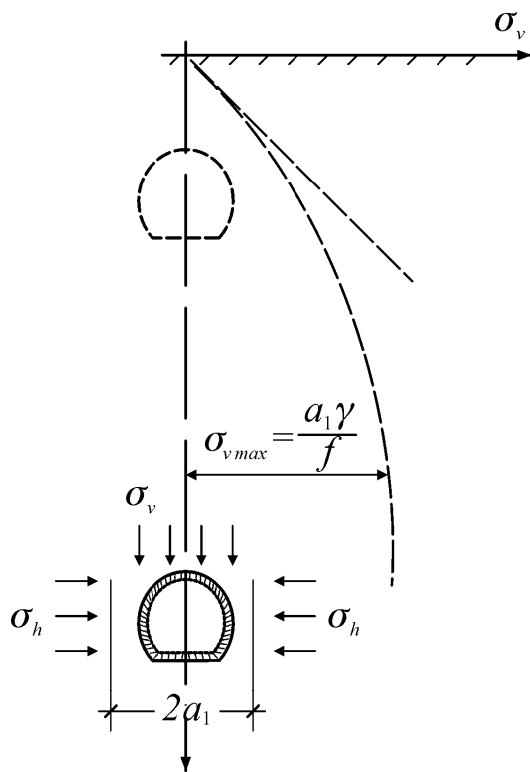
Za  $f > 4$

$$\sigma_h \cong 0$$

$$a_1 = a + a \operatorname{tg} \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

Sl. 4.5. Dispozicija paraboličnog rasteretnog svoda za kružni otvor

Kada su tuneli pritko položeni neophodno je uvesti korekcije, pa je opterećenje za plitko položene tunele:

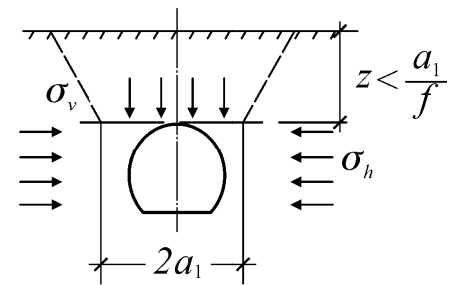


- vertikalni pritisak na podgradu:

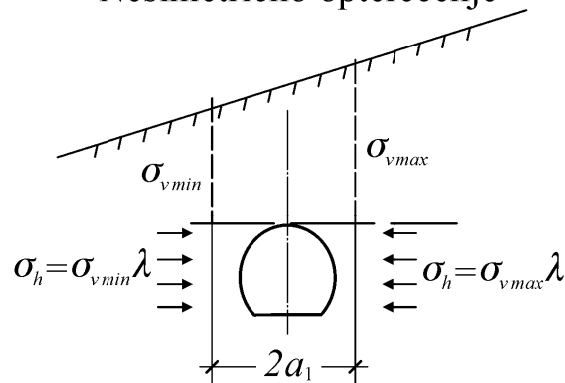
$$\sigma_v = z\gamma$$

- hor. pritisak na podgradu:

$$\sigma_h = \sigma_v \operatorname{tg}^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{ili} \quad \sigma_h = \sigma_v \lambda$$



Nesimetrično opterećenje



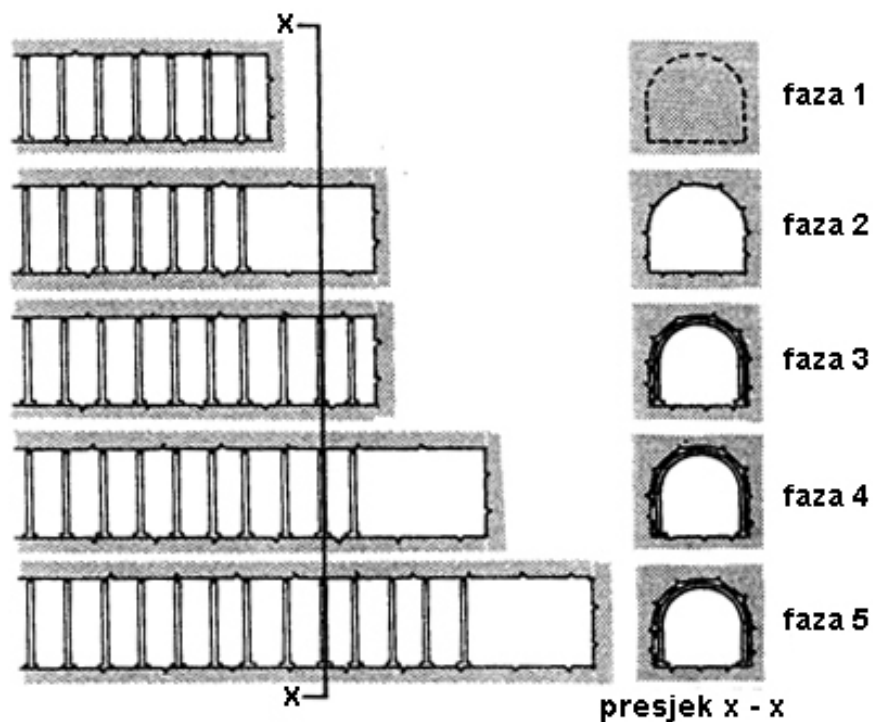
SI. 4.6. Dispozicija opterećenja za plitko položene tunele

#### 4.2. Principi dimenzionisanja tunelske konstrukcije

Dimenzionisanje tunelske konstrukcije za tunele se vrši prema fazama njenog formiranja u procesu građenja (za usvojenu tehnologiju iskopa i podgrađivanja) za pritiske koji potiču od okolnog tla i stijenske mase, podzemne vode i sopstvene težine konstrukcije kao osnovnih opterećenja, uz dopunske analize uticaja od saobraćajnog opterećenja, seizmičkih sila (vibracija), interakcije teren – konstrukcija, i drugih specifičnih dejstava, koji se mogu javiti u eksploataciji.

Faza iskopa predstavlja posebno stanje pri izvođenju radova u kojem se na ograničenom “radnom” prostoru mora osigurati bezbjednost ljudstva i opreme u vremenu koje dozvoljava kvalitet (kompetentnost) stijenske mase, a u kojem se mora formirati prva faza podgradne konstrukcije. Osim za stijenske mase visoke čvrstoće bez posebnih “oštećenja”, odnosno “izdeljenosti prslinama i pukotinama” i sl., ova faza izvođenja zahtjeva brižljivu analizu kako veličine ostvarljivog nepodgrađenog prostora, tako i vremena u kojem se taj prostor može formirati i podgraditi.





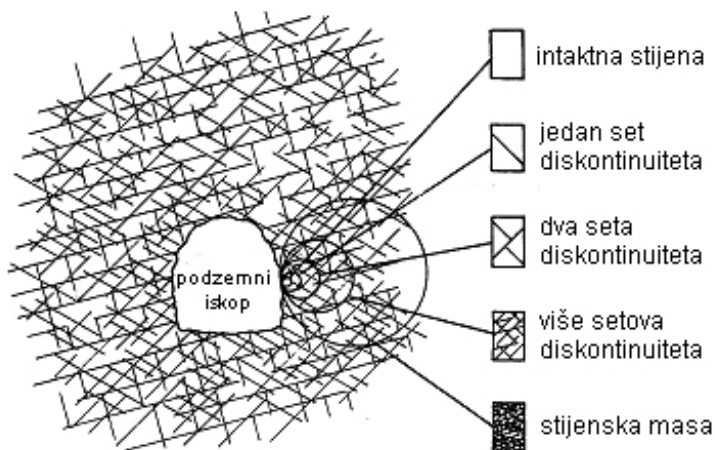
**Sl. 4.7.** Faze izvođenja iskopa i podgrađivanja

Prilikom izbora koncepcije građenja, provjera svake faze u formiranju podgradne konstrukcije i njenog konačnog oblika i dimenzija, vrši se u skladu sa procjenjenim opterećenjima i uslovima oslanjanja podgradne konstrukcije, uz određivanje potrebnih dimenzija prema propisima i tehničkim normativima, pri tome vodeći računa o dva moguća osnovna postupka dimenzionisanja:

- Postupak pri kojem se prijem dejstava na podgradnu konstrukciju tretira tako da ona ima značajno veću krutost od okolne sredine, kao što su konstrukcije od livenog betona (u oplati) ili od montažnih AB elemenata koji se monolitiziraju injektiranjem na spoju sa granicom iskopa i/ili drugim vrstama "utezanja",
- Postupak pri kojem se prijem dejstava vrši na fleksibilnu podgradnu konstrukciju (od armiranog prskanog betona) koja se preko sidara povezuje sa okolnom stijenskom masom (potrebnog nivoa kompetentnosti) i na osnovu mjerenja veličina pomjeranja ("konvergencije") u vremenu, definiše se definitivna podgradna konstrukcija koju čine prskani beton, sidra i armatura. Ovaj pristup, koji se sve više primenjuje poslednjih 30 godina, ima puno opravdanje u uslovima kada se oko tunelskog iskopa formira "noseći prsten" stijene koji se dodatno "uteže" sidrima, ali zahtjeva aktivan pristup svih učesnika u građenju tunela i njihovu motivisanost da u kraćim rokovima i sa manjim količinama betona i armature postignu potrebnu sigurnost podgradne tunelske konstrukcije.

#### 4.2.1. Uticaj izlomljenosti stijene na odabir tipa podgradne konstrukcije, statičkog proračuna i dimenzionisanje

Tip stijenske mase i njena izlomljenost imaju primaran uticaj na tip podgrade koja će biti primjenjena. Stijena oko podzemnog otvora može biti bez diskontinuiteta (intaktna stijena), sa jednim ili dva ili više setova diskontinuiteta kada se govori o stijenskoj masi, kako je prikazano na sl. 4.8. Odnos veličine-razmaka diskontinuiteta i veličine podzemnog otvora bitno utiče na izbor i proračun podgradene konstrukcije. Takođe, nivo primarnih napona u stijenskoj masi ima bitan uticaj na ponašanje stijenske mase oko podzemnog otvora.

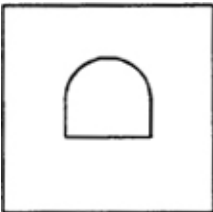
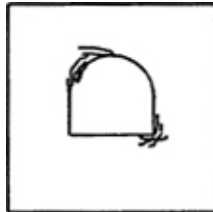

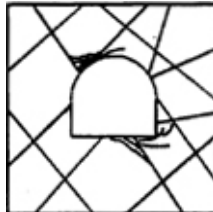
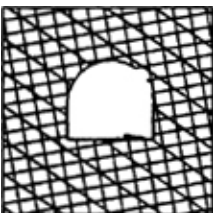
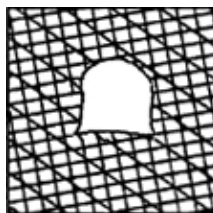


Sl. 4.8. Izlomljenost stijenske mase

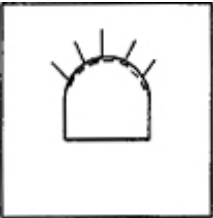
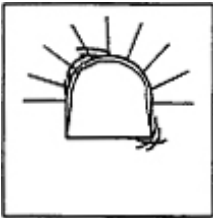


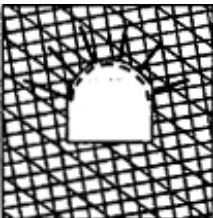
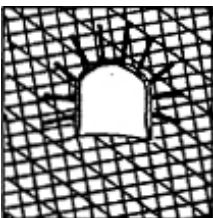
U tabeli 4.1. pregledno su prikazani osnovni slučajevi izlomljenosti stijene i njenog ponašanja oko podzemnog otvora pri niskom i visokom stanju podzemnih pritisaka, dok je u tabeli 4.2. prikazano obezbjeđenje stabilnosti različitih tipova loma stijenske mase.

Tako masivnu stijenu pri niskom stanju napona nije potrebno podgrađivati, dok se pri visokom podzemnom pritisku javljaju zone lomova u kaloti ili uglovima oporaca.

Izlomljenu stijenu karakteriše pojava ispadanja nestabilnih blokova pri niskom stanju napona (pod dejstvom gravitacije) i lokalni lomovi pri visokom naponskom nivou. Vrlo izlomljene stijenske mase pri niskom stanju napona karakterišu lokalna ispadanja komada stijene (zbog slabe stisnutosti diskontinuiteta) i propagacija loma ukoliko nisu primjenjene odgovarajuće mjere podgrade. Kod vrlo izlomljenih stijena pri visokom nivou primarnih napona u okolini otvora komadi klizaju po spojevima ili dolazi do loma pojedinih komada stijene.

	Nisko stanje napona	Visko stanje napona
Masivna stijena	 <p>Masivna stijena izložena niskom nivou napona</p> <p>Linearno elastični odgovor, moguća pojava manjih lomova ili u potpunosti bez loma stijenske mase</p>	 <p>Masivna stijena izložena visokom nivou napona</p> <p>Pojava lomova u zonama sa visokim naponskim stanjem (u kaloti ili uglovima oporaca) i širenje po okolnoj stijenskoj masi</p>
Izlomljena stijena	 <p>Masivna stijena sa relativno malim brojem diskontinuiteta, izložena niskom nivou napona</p> <p>Nestabilni stijenski blokovi klizaju po spojevima ili padaju pod dejstvom gravitacije</p>	 <p>Masivna stijena sa relativno malim brojem diskontinuiteta, izložena visokom nivou napona</p> <p>Pojava lokalnih lomova usled klizanja diskontinuiteta i lomljenja i raspadanja stijenskih blokova</p>
Vrlo izlomljena stijena	 <p>Vrlo izlomljena stijena, izložena niskom nivou napona</p> <p>Lokalni lomovi i ispadanja stijenskih blokova (zbog slabe stisnutosti diskontinuiteta). Propagacija loma ukoliko nisu primjenjene odgovarajuće mjere podgrade</p>	 <p>Vrlo izlomljena stijena, izložena visokom nivou napona</p> <p>Stijenska masa u okolini otvora se lomi usled klizanja diskontinuiteta i lomljenja i raspadanja stijenskih blokova</p>

**Tabela 4.1.** Tipovi loma koji se javljaju kod različitih stijena, pod niskim i visokim primarnim stanjem napona

	Nisko stanje napona	Visko stanje napona
Masivna stijena	 <p>Masivna stijena izložena niskom nivou napona</p> <p>Bez podgrađivanja, ankera, sidara ili armaturnih mreža</p>	 <p>Masivna stijena izložena visokom nivou napona</p> <p>Postavljanje ankera i sidara, sa armaturnom mrežom ili torkretom, da bi se spriječili dalji lomovi i stijenski blokovi držali na mjestu</p>
Izlomljena stijena	 <p>Masivna stijena sa relativno malim brojem diskontinuiteta, izložena niskom nivou napona</p> <p>Postavljanje ankera i sidara kako bi se spriječilo ispadanje i klizanje individualnih stijenskih blokova. Sidra moraju biti napregnuta</p>	 <p>Masivna stijena sa relativno malim brojem diskontinuiteta, izložena visokom nivou napona</p> <p>Gusto postavljanje ankera i sidara, sa armaturnom mrežom i mikro armiranim torkretom</p>
Vrlo izlomljena stijena	 <p>Vrlo izlomljena stijena, izložena niskom nivou napona</p> <p>Rijetko postavljanje ankera zajedno sa armaturnim mrežama i/ili torkretom da bi se spriječilo rasipanje stijenskih blokova u okolini otvora</p>	 <p>Vrlo izlomljena stijena, izložena visokom nivou napona</p> <p>Gusto postavljanje ankera i sidara sa armaturnom mrežom i mikro armiranim torkretom. U ekstremnim slučajevima moraju se primjeniti čelični lukovi sa klizajućim vezama. Razupore u invertu ili podnožni svod mogu biti neophodni za kontrolu izdizanja poda.</p>

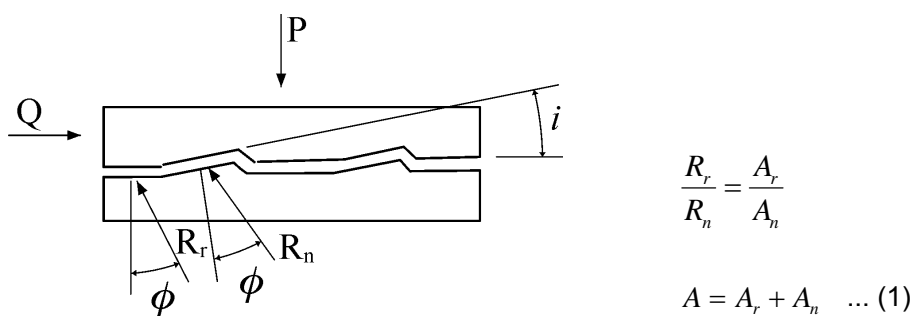
**Tabela 4.2.** Tipičan način ankerisanja za stabilizaciju – obezbjeđenje stabilnosti različitih tipova loma stijenske mase

### 4.3. Svojstva diskontinuiteta – otpornost na smicanje

#### 4.3.1. Svojstva diskontinuiteta

Smičuća otpornost stijene po diskontinuitetu se ispituje terenskim i laboratorijskim testovima. Svi testovi su generalno koncipirani tako da se stijena »in situ« ili uzorak u laboratoriji opterete normalnom silom u odnosu na ravan diskontinuiteta (označena sa  $P$  na sl. 4.9.), a da se zatim nanosi sila koja smiče uzorak po diskontinuitetu (označena sa  $Q$  na slici). Ukupnu otpornost na smicanje čini trenje i otpor neravnina po diskontinuitetu.

Prema *F. Paton*-u, diskontinuitet se može predstaviti testerastim modelom u kom se dio diskontinuiteta dodiruje preko horizontalnih površina ( $A_r$ ), a dio preko kosih površina ( $A_n$ ). Pretpostavljajući da je ugao unutrašnjeg trenja horizontalatanih i kosih površina jednak  $\phi$ , tada je i odnos  $R_r / R_n = A_r / A_n$ , s tim što je rezultatna otpora  $R_n$  nagnuta za ugao inklinacije neravnine " $i$ " u odnosu na pravac smicanja diskontinuiteta. Imajući u vidu da je kohezija duž diskontinuiteta  $c = 0$ , smičuća otpornost po diskontinuitetu se dobija prema sledećem:



Sl. 4.9. Testerasti model diskontinuiteta

Ako uvedemo oznaku:  $n = \frac{A_n}{A} \Rightarrow 1 - n = \frac{A_r}{A} \dots (2)$

Odnos smičućeg napona ( $\tau = Q / A$ ) i normalnog napona ( $\sigma = P / A$ ) iznosi:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{(1-n)\sin\phi + n\sin(i+\phi)}{(1-n)\cos\phi + n\cos(i+\phi)}; \dots (3)$$

Ako se uvede pojednostavljenje:  $\cos i \cong 1 \quad n \Rightarrow 1$

Relacija (3) tada postaje:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{\text{tg}\phi + n \text{tgi}}{1 - n \text{tg}\phi \text{tgi}} = \text{tg}\bar{\phi} = \text{tg}(\phi + i) \dots (4)$$

gdje su:

$\bar{\phi}$  - ekvivalentni ugao trenja

$i$  - ekvivalentni ugao neravnina dilatiranja

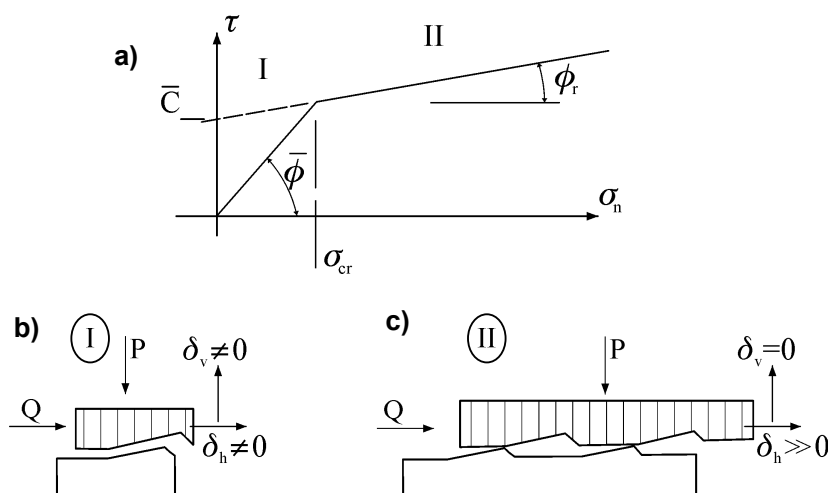
### 4.3.2. Otpornost diskontinuiteta na smicanje

#### a. Bilinearna zavisnost

Za mala pomjeranja otpor smicanju pružaju obje komponente: trenje i neravnina, pri čemu dolazi do dilatiranja – uvećanja zapremnine zbog relativnog pomjeranja stijene sa obje strane diskontinuiteta po neravnini, *sl. 4.10.b.* (zona I bilinearne zavisnosti, *sl. 4.10.a.*). Veza smičućeg i normalnog napona se definiše preko ekvivalentnog ugla trenja  $\bar{\phi}$

U zoni I, prema navedenom, važi sljedeća veza smičućeg i normalnog napona:

$$\tau_f = \sigma_n \operatorname{tg} \bar{\phi} = \operatorname{tg}(\phi + i) \sigma_n$$



**Sl. 4.10.** Bilinearni model ponašanja diskontinuiteta

Kada se, usled velikih međusobnih pomjeranja diskontinuiteta, dostigne najjstureniji dio neravnine otpor na smicanje diskontinuiteta se ostvaruje samo preko kontakta horizontalnog dijelova diskontinuiteta i vrha neravnine (*sl. 4.10.c*) i predstavlja rezidualnu smičuću otpornost (zona II na bilinearnom dijagramu, *4.10.a*). Nakon dostizanja kritičnog pomjeranja pri kritičnom normalnom naponu  $\sigma_c$ , prestaje dalje dilatiranje – uvećanje zapremine. Veza smičućeg i normalnog napona se definiše preko rezidualnog ugla trenja  $\phi_r$ .

U zoni II važi sljedeća veza smičućeg i normalnog napona:

$$\tau_f = \sigma_n \operatorname{tg} \phi_r + \bar{c}$$

Pored testerastog bi-linearnog modela postoje i nelinearne empirijske zavisnosti koje opisuju smičuću otpornost diskontinuiteta, kao što su model *Hoek-a* i *Braun-a* i model *M. Maksimovića*.

## b. Uslov loma Hoek-a i Brown-a (1980)

Hoek i Brown su predložili sljedeću zavisnost između smičućeg i normalnog napona na diskontinuitet:

$$\tau = A \sigma_c \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_c} - T \right)^B ;$$

$$T = \frac{1}{2} \left( m - \sqrt{m^2 + 4s} \right) \quad A, B, m, s - \text{empirijske konstante}$$

$m = 5$ do $25$	za čvrste stijene	$A = 0.65$ do $1.20$
$s = 0.1$ do $1$	za čvrste stijene	$B \cong 0.70$

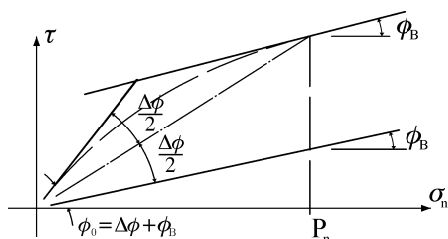
$m = 0.1$ do $0.01$	za degradirane stijene	$A = 0.05$ do $0.2$
$s = 0$ do $0.00001$	za degradirane stijene	$B = 0.04$ do $0.07$

Uslov loma preko glavnih napona po Hoek-u i Brown-u glasi:

$$\left[ \frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s} \right]$$

## c. Nelinerna veza M. Maksimovića (1988)

$$\tau_f = \sigma_n t g \left[ \phi_B + \frac{\Delta \phi}{1 + \sigma_n / P_n} \right]$$



$(\phi_B, \Delta \phi, P_n)$  – empirijske konstante

$\Delta \phi \cong 2JRC$   
 $P_n \cong JCS/10$  } empirijske konstante

$$\phi_B \cong \phi_r \quad \Delta \phi \cong \bar{\phi}_0 - \phi_B$$

**Sl. 4.11.** Nelinearna anvelopa

$$\sigma_n \gg P_n, \bar{\phi} \rightarrow \phi_B \text{ (bez dilatacije)}$$

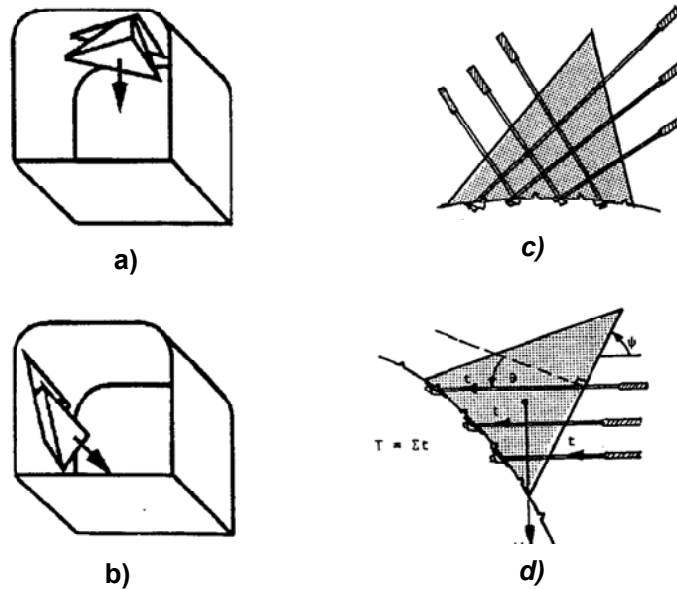
$$\sigma_n \rightarrow 0 \quad \bar{\phi}_0 \rightarrow \phi_B + \Delta \phi \rightarrow \bar{\phi}^2$$

## 4.4. Osiguranje od ispadanja blokova kod izlomljene stijene

Osiguranje od ispadanja blokova izlomljene stijene se vrši primjenom različitih vrsta ankera. Postoje dva osnovna tipa nestabilnosti blokova: ispadanje pod dejstvom gravitacije (obično u kaloti)

<sup>2</sup> Za detalj vidi M. Maksimović, *Mehanika tla*, str. 246-256

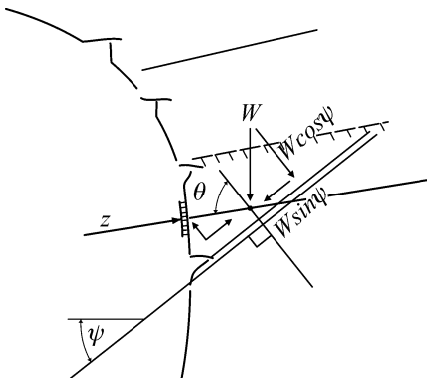
i klizanje po jednom, dva ili više diskontinuiteta (obično iz zidova podzemnog otvora), kako je prikazano na aksonometričkoj slici 4.12a i 4.12b.



**Sl. 4.12.** Ispadanje bloks pod dejstvom gravitacije (a), klizanje bloka po diskontinuitetu (b), sidrenje ispadajućeg bloka (c) i sidrenje klizajućeg bloka (d)

Na sl. 4.12.c i 4.12.d prikazani su načini sidrenja ispadajućeg i klizajućeg bloka. Pri sidrenju se teži da se ankeri postave upravno na površinu postojećih diskontinuiteta.

#### 4.4.1. Analiza stabilnosti bloka klizanjem po jednoj ravni



**Sl. 4.13.** Klizanje bloka po jednoj ravni

$$F_s = \frac{(W \cos \psi + Z \cos \theta) \operatorname{tg} \bar{\phi}}{W \sin \psi - Z \sin \theta}$$

$$F_s = 1.5 - 2.0 \Rightarrow \text{blok stabilan}$$

$$\operatorname{tg} \bar{\phi}_m = \frac{\operatorname{tg} \bar{\phi}}{F_s} = \frac{W \sin \psi - Z \sin \theta}{W \cos \psi + Z \cos \theta}$$

Kada nema ankera ( $Z = 0$ ), obrazac za faktor sigurnosti se svodi na faktor sigurnosti

$$\text{bloka na kosoj ravni: } F_{sp} = \frac{\operatorname{tg} \bar{\phi}}{\operatorname{tg} \psi}$$



Oznake:

$Z$  - sila u ankeru

$W$  - težina bloka

$\varphi$  - nagib diskontinuiteta

$\theta$  - ugao između normale na diskontinuitet i pravca ankera

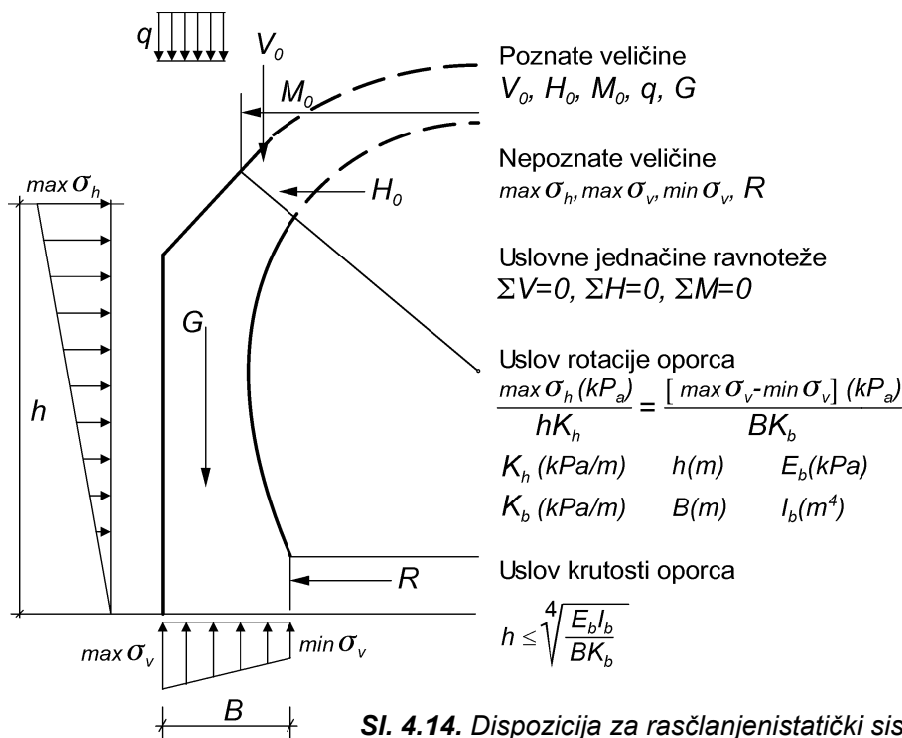
$F_s$  - faktor sigurnosti ( $F_s > 1.5 - 2.0$ )

#### 4.5. Statički proračun tunelske konstrukcije (vrlo izlomljene stijesne mase)

Statički proračuni tunelske konstrukcije se zasnivaju na postupcima tehničke mehanike, propisima i standardima kojima se uređuje ova oblast, a u skladu sa razvojem u oblasti konstrukterstva ovi proračuni dobijaju odgovarajuće oblike tj. algoritme.

##### 4.5.1. Raščlanjeni statički sistem

Raščlanjeni statički sistemi su korišćeni za proračun klasičnih-livenih betonskih tunelskih konstrukcija. Najjednostavniji oblici proračuna tunelske konstrukcije su se zasnivali na postupku koji polazi od raščlanjene tunelske konstrukcije, gdje se gornji dio tj. svod (kalota) tretirao kao lučni nosač koji je uklješten u gornje dijelove masivnih bočnih oporaca, ili kao lučni nosač u kojem se dopušta stvaranje zglobova. Masivni oporac se tretirao kao kruta konstrukcija elastično oslonjena u svojoj osnovi i bočnoj strani, a zglobno razuprta tj. kruto oslonjena u nivou podnožnog svoda.

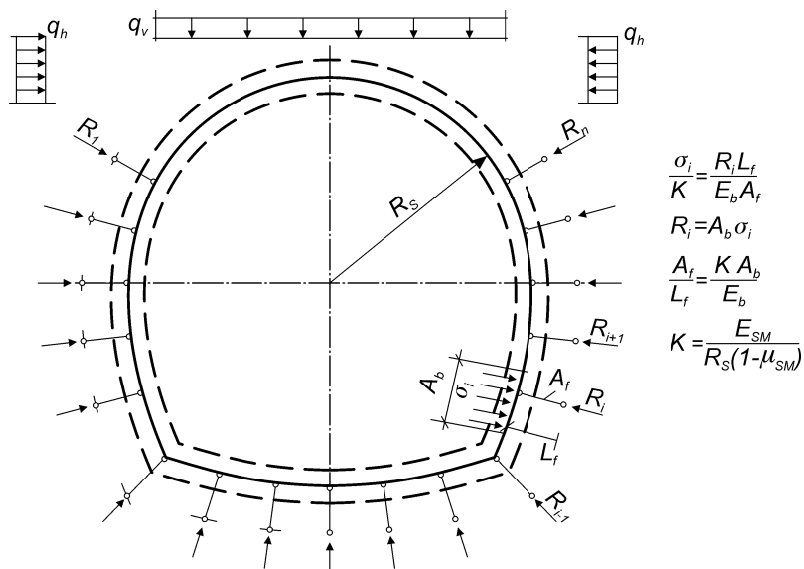


Primenom poznatih rešenja za uticaje u lučnom nosaču dobijaju se reakcije (sile i momenti) na spoju sa masivnim oporcem, koji se onda dimenzioniše pod uslovom krutog ponašanja (rotacije) uz primenu uslova ravnoteže.

#### 4.5.2. Winkler–ov model

Savremeniji oblici statičkog proračuna se zasnivaju na postupcima koji proističu iz primene “metode sila” ili “metode deformacija”, tako što se tunelska konstrukcija aproksimira sa konačnim brojem linijskih elemenata (štapova), koji na jednom delu konture (spoja sa stijenskom masom) primaju pritiske, a drugom dijelu konture te pritiske prenose na stijensku masu preko fiktivnih oslonaca tj. prostih štapova kojima se elastična pomjeranja određuju na osnovu koeficijenta reakcije tla (analogno *Winkler* – ovom modelu). Kod većine saobraćajnih tunela izgrađenih u periodu od 1930. do 1970. godine bio je primjenjivan navedeni oblik proračuna, a tek nakon 1970. godine se postepeno uvode postupci zasnovani na diskretizaciji konstrukcije i okolne sredine.

Nakon što su stečena iskustva kako u proračunima tako i kroz mjerenja stvarno realizovanih uticaja u konstrukciji, pomjeranja i sila na konturi konstrukcija - stijenska masa, formiraju se i uprošćeniji postupci zasnovani na pojednostavljenim oblicima dijagrama pritisaka na spoljnoj konturi tunelske konstrukcije, što je omogućilo da se za neke tipične oblike tunelskih konstrukcija kao što su potkovičasti i kružni brzo određuju karakteristični uticaji (momenti savijanja i normalne sile).



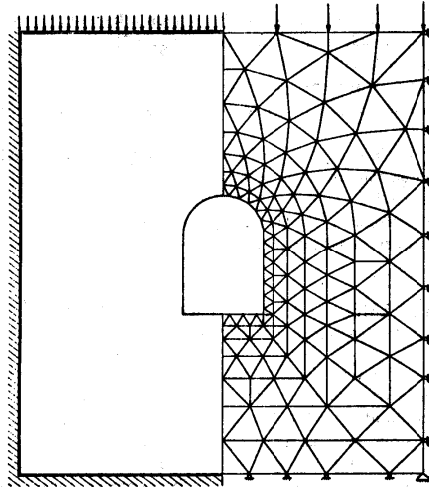
Sl. 4.15. Satički sistem za Winklerov model interakcije

#### 4.5.3. Proračuni zasnovani na primjeni metode konačnih elemenata (MKE) i metode graničnih elemenata (MGE)

Kompleksnije proračune interakcije stijenske mase i tunelske konstrukcije, koji se sprovode za svaku pojedinačnu fazu iskopa i podgrađivanja, moguće je sprovesti, ali uz primjenu odgovarajućih

programskih paketa (zasnovanih na MKE ili MGE), i uz adekvatno poznavanje deformacionih svojstava i čvrstoće stijenske mase.

Ovakvi proračuni još uvijek nisu stekli definitivan oblik, da bi se mogli definisati propisima, i onda "jednoznačno" primjenjivati, već se najčešće koriste za parametarsku analizu kojom se posebno utvrđuje uticaj pojedinih parametara ili pretpostavki, koje se nalaze u osnovi proračuna, na sračunate uticaje u konstrukciji.



**Sl. 4.16.** *Primjer mreže konačnih elemenata (lijevo kontinuum, desno diskretizacija)*

#### 4.5.4. Semiempirijski postupci statičkih proračuna

Semiempirijski postupci statičkih proračuna, su dobili na značaju u periodu nakon 1970. godine, kada se sve više uvodi u praksu građenja tunela primena armiranog prskanog betona sa sidrima kojima se ostvaruje specifično sadejstvo "rasteretnog prstena" stijenske mase oko tunelske konstrukcije, što omogućava da se ostvaruju ograničena (dozvoljena) pomjeranja na konturi podgradne konstrukcije i iskopa, uz postepeno "ojačavanje" inicijalne konstrukcije sa dodatnim sidrima i dodatnim slojevima prskanog betona. Ovakve podgradne kostrukcije se obično svrstavaju pod naziv "Nova Austrijska Tunelska Metoda" (NATM).

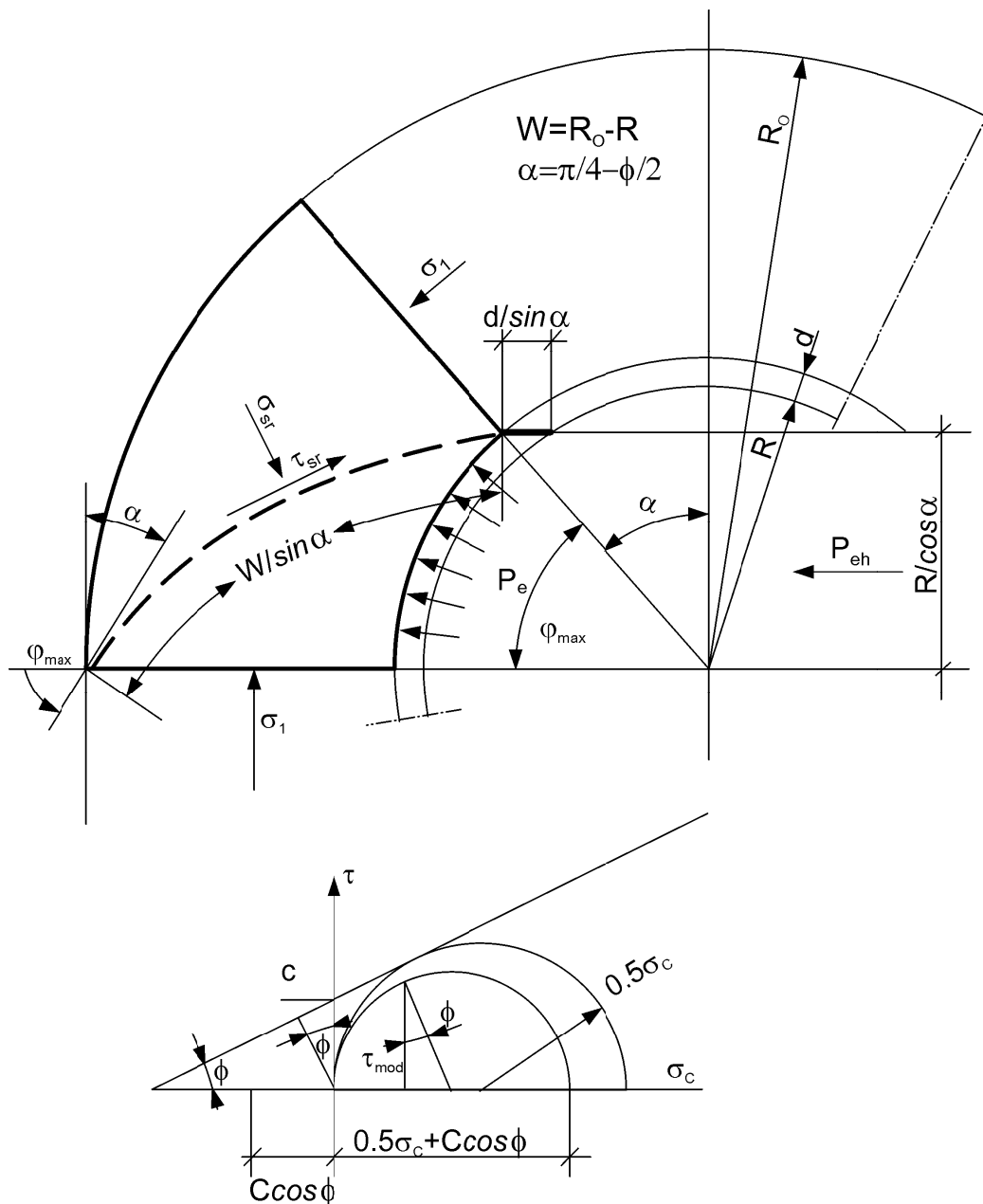
Dimenzionisanje "NATM" podgradne konstrukcije se zasniva na semiempirijskom postupku u kojem se postavlja uslov ravnoteže između reaktivnih komponentalnih sila koje pružaju mlazni beton, armatura i sidra, i sile pritiska na podgradu koja se ostvaruje u "nosivom prstenu" koji se formira u stijenskoj masi oko podgradne konstrukcije. Pri tome, zasnivajući se na brojnim osmatranjima i mjerenjima ponašanja "NATM" fleksibile podgradne konstrukcije, protagonosti ovog tipa podgrade Prof. *Rabcewicz* i ing. *Sattler* su kao model ponašanja za granično stanje sloma podgrade usvojili formiranje horizontalne površine smicanja, s tim da se njen položaj može definisati uglom  $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$ , gde je  $\varphi$  - parametar trenja u uslovu čvrstoće Kulon – Mora (sl.4.17 i sl.4.18). Horizontalna površina smicanja kroz podgradu se nastavlja kao zakrivljena površina u zoni "nosivog prstena" tako što zaklapa isti ugao  $\alpha$  sa tangentom na spoljnoj granici "nosivog prstena" tj. na graničnoj površini gde se stijenska masa nalazi u kvazi-elastičnom

ponašanju. Zbog simetrije u formiranju navedene površine smicanja, postavljanje ravnotežnih uslova se vrši za jednu četvrtinu kružnog presjeka, kao osnovnog tipa podgradne konstrukcije.

Pri postavljanju ravnotežnog uslova polazi se od toga da su reaktivni pritisci u radijalnom smjeru  $p_e$  ravnomjerno raspoređeni duž konture iskopa i da se njihova rezultanta u horizontalnom smjeru dobija integraljenjem horizontalnih komponenti radijalnih pritisaka i ima vrednost:

$$P_{eh} = p_e R \cos \alpha$$

gdje je  $R$  – poluprečnik konture iskopa



Sl. 4.17.

U području ugla  $\max \psi = \pi/4 - \alpha$  reaktivna sila  $P_{eh}$  stoji u ravnoteži sa horizontalnom komponentom sile smicanja koja se javlja duž naprijed navedene zakrivljene površine smicanja u stijenskoj masi na dužini  $W/\sin \alpha$ , gde je  $W$  - debljina "zone nosećeg prstena" tj.  $W = R_o - R$ , gdje je  $R_o$  - poluprečnik granične površine "nosećeg prstena" i stijenske mase u kvazi-elastičnom ponašanju.

Iz navedenih rasmatranja proizilazi uslovna jednačina ravnoteže:

$$p_e R \cos \alpha = sr\tau \cos sr\psi - sr\sigma \sin sr\psi \frac{W}{\sin \alpha}$$

u kojoj su:

$sr\tau$  - prosječni napon smicanja na zakrivljenoj površini smicanja

$sr\sigma$  - prosječni normalni napon na zakrivljenoj površini smicanja

$sr\psi$  - prosječni ugao koji površina smicanja zaklapa sa horizontalom

ovde su uvedena sljedeća uprošćenja:

$$sr\psi = 0.5 \max \psi, \quad sr\sigma \approx 0$$

$$sr\tau = \tau_{mob} = 0.5(0.5\sigma_c + C \cos \varphi) \cos \varphi$$

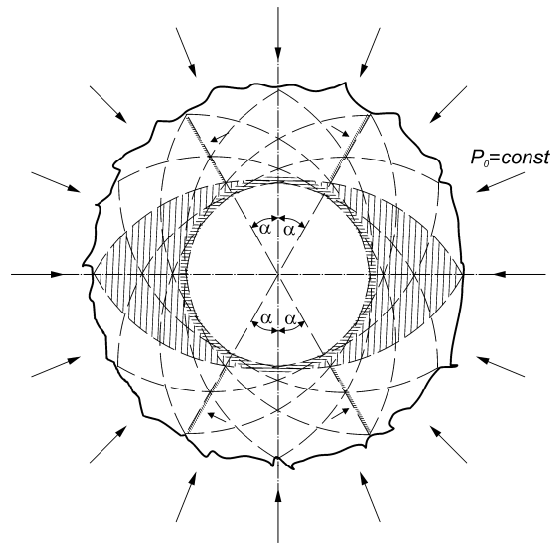
gdje je  $\sigma_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$  - pritisna čvrstoća izražena preko parametara Kulon-Morove anvelope  $C, \varphi$ .

Unošenjem naprijed navedenih veličina u uslovnu jednačinu ravnoteže dobija se zavisnost potrebnog reaktivnog pritiska od odnosa debljine "zone nosivog prstena" prema poluprečniku iskopa i parametara čvrstoće stijenske mase:

$$p_e(\tau_{mob}) = \frac{W \cos \varphi (2 - \sin \varphi) C \cos \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\varphi}{4} \right)}{R(1 - \sin \varphi)}$$

Ovde je uvedeno ograničenje u pogledu veličine  $\tau_{mob}$  koje je grafički prikazana sa ostalim elementima na sl. 4.17.

Ostaje međutim neodređeno na koji se način određuje veličina  $W$  tj. ona se može odrediti na osnovu veličine dozvoljene konvergencije tj. "proširenja zone nosivog prstena pri nastajanju loma stijenske mase u toj zoni, ili na osnovu neke druge relacije između reaktivnog opterećenja i veličine te zone kao što je npr. rešenje *Kastner-a*.



**Sl. 4.18.**

Komponentalne sile koje pružaju elementi podgradne konstrukcije se sračunavaju kroz “ekvivalentne reaktivne pritiske”:

$$p_{eb} R \cos \alpha = \frac{\tau_b d}{\sin \alpha}$$

$$p_{ea} R \cos \alpha = \frac{\tau_a f_a}{\sin \alpha}$$

$$p_{es} = \frac{S}{e_r e_l}$$

gdje su:

$p_{eb}$ ,  $p_{ea}$ ,  $p_{es}$  - reaktivni ekvivalentni pritisci, betona, armature i sidara

$f_a$  - površina armature na 1m dužine tunela,

$\tau_b$  - čvrstoća betona na smicanje (obično 20% od pritiskne čvrstoće)

$\tau_a$  - čvrstoća armature na smicanje (obično se usvaja  $\tau_a / \tau_b = E_a / E_b$ )

$S$  - maksimalna dozvoljena sila u sidru.

$e_r$ ,  $e_l$  - radijalno i podužno rastojanje kojima se definiše površina

djelovanja jednog sidra

Sidra obično prenose 75–80% ukupne sile, torkret 10–15%, a armatura oko 5%.

Konačna uslovna jednačina dobija oblik:

$$F_s \cdot p_e(\tau_{mob}) = p_{eb} + p_{ea} + p_{es}$$

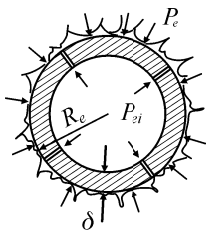
gde je  $F_s$  - faktor sigurnosti (reda veličine 1.30).

Postoje međutim komercijalni računarski programski paketi specijalno namjenjeni proračunu NATM podgrade (npr. PHASE- 2, FALC, PLAXIS i dr.) u kojima se NATM podgrada razmatra kao kontinualan sistem štapova koji su sidrima vezani za okolnu stijensku masu, i gde se dimenzije podgrade određuju na osnovu sračunatih momenata savijanja i normalnih sila.

#### 4.6. Naponi u tunelskoj oblozi u uslovima rotacione simetrije. Interakcija betonske obloge i stijene. Karakteristična kriva stijenske mase.

##### 4.6.1. Tanka obloga

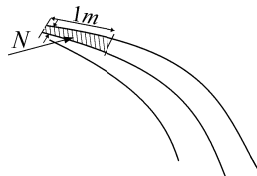
Obloga se obično tretira kao "tanka" ako je ispunjen uslov  $\delta \sim \frac{1}{50} R_e$ , gdje je  $\delta$  - debljina obloge, a  $R_e$  - eksterni (spoljni) poluprečnik obloge. Ako je ispunjen predhodni uslov, tada se u oblozi javljaju samo tangetni naponi (obloga se ponaša kao ljuska koja ne prenosi momente).



$$(kP_a) \quad \sigma_\theta = \frac{N(kN)}{\delta \times 1.00}$$

$$N = P_e R_e \square$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_e R_e}{1.00} \left( \frac{kP_a}{m'} \right)$$



##### 4.6.2. Debela obloga

Za rotaciono simetrično radijalno opterećenje debele obloge (kada je obloga znatno deblja od gore navedenog uslova za tanku oblogu) važe sljedeći izrazi:

$$\sigma_\theta = \frac{P_e R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} + \frac{P_e R_e^2 R_i^2}{r^2 (R_e^2 - R_i^2)}$$

+ → pritisak

- → zatezanje

$$\sigma_\theta = \frac{P_e R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} - \frac{P_e R_e^2 R_i^2}{r^2 (R_e^2 - R_i^2)}$$

$$\sigma_l = \sigma_z = \mu_B (\sigma_\theta + \sigma_r) = const$$

za uslov  $\varepsilon_l = 0$ , ravna deformacija,  $\sigma_l = \mu_B 2 \frac{P_e}{1 - \frac{R_i}{R_e}}$

Odgovarajuće dilatacije su:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E_b} \{ \sigma_{\theta} - \mu_B (\sigma_r + \sigma_l) \}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta U_r}{\Delta_r}, \varepsilon_r = \frac{1}{E_b} \{ \sigma_r - \mu_B (\sigma_{\theta} + \sigma_l) \}$$

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E_b} \{ \sigma_l - \mu_B (\sigma_{\theta} + \sigma_r) \}$$

a) Iz uslova ravne deformacije  $\varepsilon_l = 0$

$$U_{rb} = \varepsilon_{\theta} \cdot r = \frac{r}{E_b} \{ \sigma_{\theta} - \mu_B [\sigma_r + \mu_B (\sigma_{\theta} + \sigma_r)] \}$$

$$U_{\theta b} = c \cdot r \quad (\text{kretanje cilindra kao krutog tijela})$$

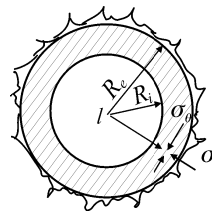
$$U_{rb}(P_e) = \frac{P_e}{E_b} \frac{1 + \mu_B}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \cdot r \cdot \left\{ 1 - 2\mu_B + \left(\frac{R_i}{r}\right)^2 \right\}$$

b) Za ravno stanje napona  $\sigma_l = 0$

(obloga sa čestim poprečnim otvorenim spojnica)

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_b} \{ \sigma_r - \mu_B \sigma_{\theta} \}$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E_b} \{ \sigma_{\theta} - \mu_B \sigma_r \}$$



$$U_r(P_e) = \frac{P_e}{E_b} \frac{r}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \left\{ 1 - \mu_B + (1 + \mu_B) \left(\frac{R_i}{r}\right)^2 \right\}$$

$$U_r(P_{e,r}) = \frac{P_e}{E_b} \frac{1 + \mu_B}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} r \left\{ \frac{1 - \mu_B}{1 + \mu_B} + \left(\frac{R_i}{r}\right)^2 \right\}$$



Na ekstradosu važe relacije:

$$\begin{aligned} \Delta O &= 2\Delta R_e \pi \\ \Delta O &= 2R_e \pi \varepsilon_\theta \quad R_e \varepsilon_\theta = \Delta R_e \\ \Delta R_e &= U_{rb(r=R_e)} = \frac{P_e R_e}{E_b} \frac{1 + \mu_B}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \left[ 1 - 2\mu_B + \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2 \right] \quad \dots (1) \end{aligned}$$

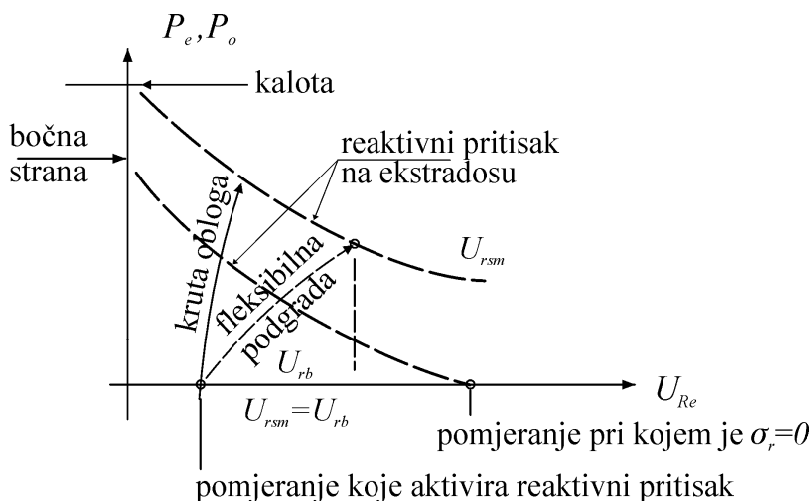
Pomjeranje u stijenskoj masi za  $\Delta p = P_o - P_e$  je dato izrazom:

$$U_{rsm} = \frac{1 + \mu_{sm}}{E_{sm}} (P_o - P_e) R_e \quad \dots (2)$$

Iz uslova  $U_{rb}(r=R_e) = U_{rsm}(R_e)$ , izjednačavanjem izraza (1) i (2), dobija se vrednost  $P_e$  koja obezbjeđuje interakciju stijene i betona.

#### 4.6.3. Koncept „karakteristične krive“ stijenske mase

Pritisak stijenske mase na podgradnu konstrukciju značajno zavisi od radijalnih pomjeranja konture iskopa koja su se ostvarila prije uspostavljanja ravnoteže između aktivnih pritisaka stijenske mase i reaktivnog otpora podgrade. Na *sl. 4.19.* isprekidanom linijom je prikazana zavisnost pritiska stijenske mase od ostvarenog radijalnog pomjeranja (u kaloti i bočnim stranama). Kao što se vidi sa dijagrama, što su veća radijalna pomjeranja  $U_{Re}$  (do izvjesne granice), to je pritisak stijenske mase na oblogu manji ( $P$ ), jer sa razvojem deformacija dolazi do preraspodjele sila. Sile koje „vladaju“ u okolini otvora se „sele“ u unutrašnjost stijenske mase, tako da ova preraspodjela, koja zavisi od ostvarenih pomjeranja, povoljno utiče na nivo pritiska stijenske mase na oblogu.



**Sl. 4.19.** Karakteristične krive pritiska stijenske mase i sila u oblozi

Ako se tunnel podgrađuje klasičnom krutom betonskom konstrukcijom tada se u oblozi javljaju odgovarajuće sile, koje su proporcionalne krutosti. U ovom slučaju ostvaruju se relativno mala pomjeranja stijene, jer podgrada uz male deformacije uspostavlja ravnotežu, pa su sile koje

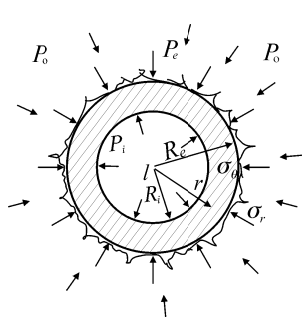
preuzima podgrada velike. Ove sile se mogu očitati sa dijagrama - presjek isprekidanih linija pritiska stijenske mase i linije deformacije krute podgrade.

Ukoliko je podgrada fleksibilna (NATM – sidra, armaturne mreže i prskani beton) ostvaruju se relativno velika pomjeranja do uspostavljanja ravnoteže, pa su i sile u podgradnoj konstrukciji proporcionalno manje. Ove sile se mogu očitati sa dijagrama - presjek isprekidanih linija pritiska stijenske mase i linije deformacije fleksibilne podgrade. Kao što se vidi sa dijagrama, ove sile su znatno manje od sila koje se javljaju u krutoj oblozi. Manje sile zahtjevaju i jefitiniju oblogu, što za linijske sisteme kakvi su tuneli donosi velike uštede pri građenju.

Treba napomenuti da vrijeme koje protekne od iskopa do trenutka postavljanja obloge (ili pomjeranje koje se razvije za to vrijeme), takođe igra bitnu ulogu u aktiviranju sila u oblozi koje dovode do uspostavljanja ravnoteže. Ukoliko je ovo vrijeme kratko, obloga će preuzeti veće sile, a ako je dugo može doći do urušavanja tunela zbog prevelikih deformacija koje dovode do rastresanja stijenske mase.

#### 4.7. Hidrotehnički tuneli – sadejstvo betonske obloge i stijenske mase

Ukoliko na debelu oblogu, osim rotaciono simetričnog radijalnog pritiska spolja (koji potiče od stijenske mase), djeluje i hidrostatički pritisak iznutra, tada važe sljedeće formule za tangenti i radijalni napon u oblozi:



$$\sigma_{\theta} = \frac{P_e - P_i \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} + \frac{(P_e - P_i) \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \left(\frac{R_i}{r}\right)^2$$

$$\sigma_r = \frac{P_e - P_i \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} - \frac{(P_e - P_i) \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \left(\frac{R_i}{r}\right)^2$$

$$\text{Za } \varepsilon_l = 0 = \frac{1}{E_B} [\sigma_l - \mu_B (\sigma_r + \sigma_{\theta})]$$

$$\sigma_l = 2\mu_B \frac{P_e - P_i \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2}$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E_B} [\sigma_{\theta} - \mu_B (\sigma_r + \sigma_l)]$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_B} [\sigma_r - \mu_{\theta} (\sigma_{\theta} + \sigma_l)]$$

Sadejstvo na ekstradosu se dobija superpozicijom izraza za  $\Delta R_{e_B} = R_{e_B} = \varepsilon_{\theta}(R_e)$

$$(1) \quad \Delta R_{e_B} (P_i > 0; P_e = 0)$$

$$-\Delta R_{e_B} = \frac{2P_i}{E_{bz}} \frac{1 - \mu_B^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2} \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2 R_{e_B}$$

$$\text{smjenom : } \beta = \frac{R_i}{R_e} \quad \beta^2 = \left(\frac{R_i}{R_e}\right)^2, \quad s_0 = 1 - \beta^2 \quad \text{i} \quad q_0 = 1 + \beta^2$$

$$-\Delta R_e = 2 \frac{P_i}{E_{bz}} \frac{1 - s_0}{s_0} (1 - \mu_B^2) R_{e_B}$$

$$(2) \quad \Delta R_{e_B} (P_i = 0; P_e > 0) \text{ je u smjeru ka osi tunela}$$

$$+\Delta R_e = \frac{P_e R_e}{E_b s_o} (q_0 - 2\mu_B)(1 + \mu_B)$$

## 5. METODE I TEHNOLOGIJA IZGRADNJE PODZEMNIH OBJEKATA

Građenje tunela u suvozemnim uslovima se obavlja na tri osnovna načina: miniranjem (laki tunelski iskopi), primjenom tunelskih otkopnih mašina u punom profilu TBM (srednje teški uslovi iskopa) i primjenom otvorenog i zatvorenog štita (teški i vrlo teški uslovi iskopa).

### 5.1. Izrada lakih tunelskih iskopa, osnovi primjene eksploziva u podzemnim iskopima

Iskop sa sistematskom primjenom miniranja se vrši u stijenama kod kojih pritisna čvrstoća monolita nije manja od 150MPa, a pri tome se koristi postupak "konturnog miniranja", pri kojem se postižu željeni efekti ekonomičnosti i/ili glatkosti konture iskopa sa minimalnim vanprofilskim prekopima.

Podgrađivanje se vrši mjestimično da bi se obezbjedila bezbjednost od lokalnih ispadanja komada ili blokova stijene i to sa primjenom prskanog betona i lokalnog sidrenja. Ako se pri iskopu javlja priliv podzemne vode gradi se posebna dopunska konstrukcija za hidroizolaciju tunela.

Otkop projektovanog otvora tunelske cijevi u čvrstim stijenskim masama uglavnom se vrši uz primjenu eksploziva-miniranjem. Ovaj postupak podrazumjeva bušenje minskih bušotina određene dubine, prečnika i rasporeda i njihovo punjenje odgovarajućom količinom eksploziva. Aktiviranjem mina (minom se naziva bušotina napunjena eksplozivom) tj. eksploziva razara se stijenska masa i pri tome vrši iskop tunela. Zadatak miniranja pri izgradnji tunela je da se izvede iskop projektovanog gabarita i oblika poprečnog presjeka tunela uz minimalno oštećenja i rastresanje stijenske mase izvan linije iskopa.

#### 5.1.1. Definicija i osnovne vrste eksploziva koji se koriste u tunelogradnji

Eksplozivi su hemijska jedinjenja - smješe koje u kratkom vremenu, koje se mjeri u milisekundama, kada se aktiviraju prelaze iz čvrstog agregatnog stanja u gasovito i pri tome razvijaju veliku količinu gasova i oslobađaju znatnu toplotu. Eksplozivi se mogu podijeliti prema: dejstvu, hemijskom sastavu, agregatnom stanju, sigurnosti i načinu eksplozije. Za primjenu u tunelogradnji najinteresantnija je podjela prema brzini detonacije, prema kojoj se eksplozivi mogu podijeliti na sporo dejstvujuće (deflagrantne) i brzodejstvujuće (brizantne).

##### a) Sporo dejstvujući (deflagrantni) eksplozivi

Klasičan predstavnik sporo dejstvujućih eksploziva je crni barut. **Crni barut** je smješa 75% kalijeve šalitre, 15% drvenog uglja i 10% sumpora. Ovaj eksploziv, koji je bio u upotrebi vijekovima, danas se više ne koristi. Mana ovog eksploziva je što se oslobađa velika količina dima i štetnih gasova uz relativno slab učinak. Brzina sagorijevanja baruta je od 500-1000m/s, pri čemu se razvija temperatura od 600-700°C.

## b) Brzodejstvujući (brizantni) eksplozivi

Brzodejstvujući eksplozivi se dijele u dvije grupe: proste i složene.

Najpoznatiji predstavnik prostih brizantnih eksploziva je **nitroglicerina** (čine ga esteri azotne kiseline – jedinjenja azotne kiseline sa raznim vrstama alkohola).

Složeni eksplozivi su smješe koje se dobijaju mješavinom neaktivnih i aktivnih komponenti. Dva dosta korišćena eksploziva iz ove grupe su dinamit i eksplozivi na bazi amonijeve šalitre.

**Dinamit** je smješa nitroglicerina sa masama koje ostaju neaktivne i/ili aktivnih supstanci koje pojačavaju osnovno dejstvo nitroglicerina (*Nobel* 1864). Osnovni sastojci dinamita su nitroglicerina i infuzorska zemlja. U zavisnosti od vrste dinamita učešće ovih komponenti se kreće od 45% do 75% nitroglicerina i 25% do 50% infuzorske zemlje. Brzina sagorijevanja je od oko 7500m/s, pri čemu se razvija temperatura oko 3200°C. Mana ovog eksploziva je što se zamrzava na temperaturi od +8°C i tada je opasan za rad jer se aktivira pri trenju i udaru.

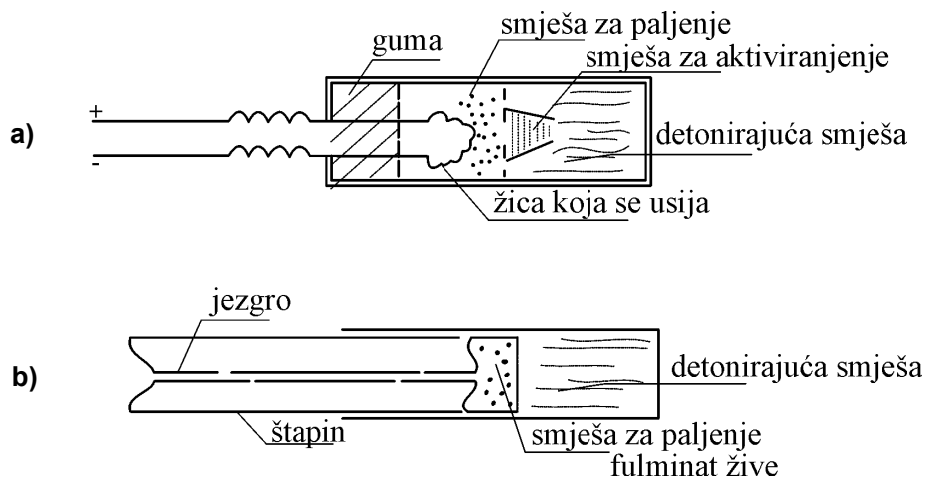
**Eksplozivi na bazi amonijeve šalitre** (amonijev nitrat) su mnogo sigurniji za rad od dinamita jer su malo osjetljivi na udar i trenje. Proizvode se kao želatinirani ili neželatinirani. Na našem prostoru se proizvode pod fabričkim nazivima: amonal, amonit, kamniktit (*Miloje Zakić* - Kruševac, Srbija) i Virezit (BiH) i dr. Brzina sagorijevanja je oko 5000m/s, pri čemu se razvija temperatura oko 4000°C. Nedostatak ovih eksploziva je što su hidroskopni, upijaju vlagu, što im smanjuje efekte.

## c) Inicijalni eksplozivi

Inicijalni eksplozivi su obično prosti brizantni eksplozivi koji imaju osobinu da direktno pod mehaničkim ili toplotnim dejstvom eksplodiraju. Ova osobina se koristi da se sa malom količinom ovih eksploziva izazove eksplozija drugih vrsta eksploziva, koji se teže aktiviraju, ali imaju veće razorno dejstvo i sigurniji su za upotrebu u većim količinama. Inicijalni eksplozivi se koriste za punjenje kapisli kojima se aktiviraju brizantni eksplozivi.

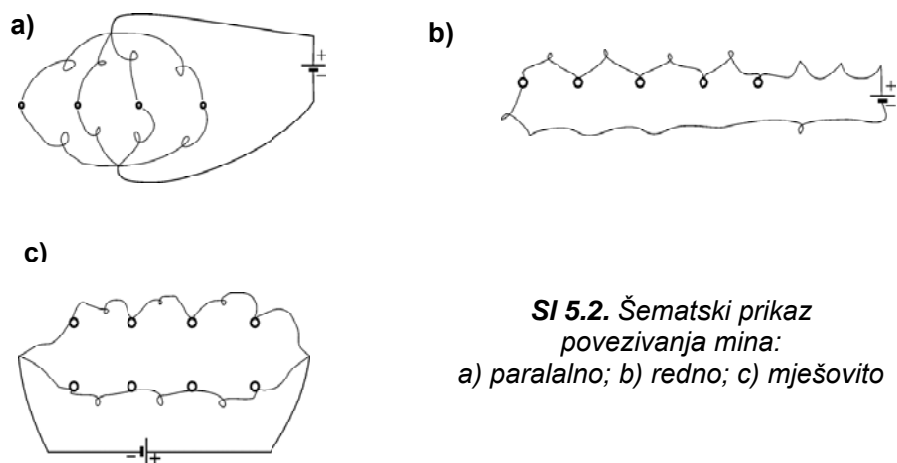
**Kapisle** se mogu podijeliti na električne i neelektrične (sa štapinom). Na *sl. 5.1.a* prikazana je šema konstrukcije električnog detonatora. Aktiviranje električne kapisle se vrši jednosmjernom strujom koja zagrijava žicu unutar smješe za paljenje, koja dalje inicira smještu za aktiviranje. Detonirajuća smješa eksplodira i na taj način aktivira brizantni eksploziv u kojem je postavljena.

Na *sl. 5.1.b* prikazana je šema konstrukcije neelektričnog detonatora. Aktiviranje neelektrične kapisle se vrši štapinom koji se sastoji od platnenog omotača i punjenja od crnog baruta. Crni barut u štapinu se pali šibicom na jednom kraju, a drugi kraj je fiksiran u kapisli. Kada barut zagrijavanjem aktivira fulminat žive, koji dalje inicira detonirajuću smještu.



**Sl. 5.1.** Šematski prikaz kapisle: a) električna, b) neelektrična

Kod aktiviranja mina u tunelogradnji redovno je potrebno aktivirati veći broj mina istovremeno ili kratkom vremenskom intervalu jednu grupu mina za drugom. Danas se za aktiviranje mina koriste uglavnom električne kapisle (mada postoje i modernije verzije štapina i neelektričnih detonatora). Mine je generalno (kako je prikazano na sl. 5.2.) moguće povezivati: redno, paralelno ili mješovito. Koji tip povezivanja će biti korišćen zavisi od konkretne situacije i projekta tj. redosleda aktiviranja pojedinih mina u poprečnom profilu.



**Sl 5.2.** Šematski prikaz povezivanja mina:  
a) paralelno; b) redno; c) mješovito

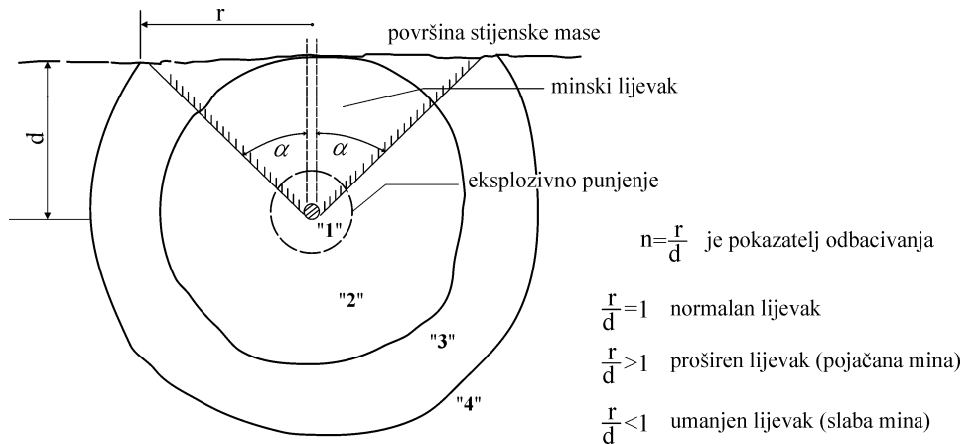
### 5.1.2. Dejstvo mine i optimizacija miniranja

#### Dejstvo mine

Kada se izvrši detoniranje (aktiviranje) eksploziva koji je postavljen u minskoj bušotini dolazi do »statičkog« i «dinamičkog» dejstva eksploziva, tj. gasova koji se oslobađaju. Statičko dejstvo se ogleda kroz pritisak gasova i povišenu temperaturu. Dinamičko dejstvo se javlja u vidu udara

uslijed brzog oslobađanja gasova i zavisi od energetskog kapaciteta primjenjenog eksploziva. Kombinovano statičko i dinamičko dejstvo eksploziva dovodi do razaranja stijenske mase. U pogledu intenziteta i efekata koji se ostvaruju javljaju se četiri zone u vidu koncentričnih krugova:

1. Zona drobljenja
2. Zona razlamanja i potiskivanja (stijena se odbacuje iz prirodnog položaja)
3. Zona rastresanja (bez pomjeranja stijene iz prirodnog položaja)
4. Zona potresa (bez efekata na mehaničke promjene u stijenskoj masi)



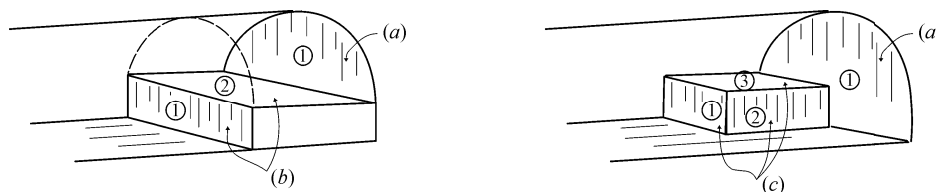
**Sl. 5.3. Prikaz dejstva zona djelovanja u stijenskoj masi i "lijevka dejstva"**

Pod dejstvom eksploziva u stijenskoj masi se javlja »lijevak dejstva« eksplozije - minski lijevak. Minski lijevak se formira u obliku kupastog otvora u stijeni nastalog odbacivanjem stijene u pravcu slobodne površine stijenske mase, *sl. 5.3*. Kada je odnos  $r/d=1$  za lijevak kažemo da je normalan ( $d$  - rastojanje najmanjeg otpora;  $r$  - radijus dejstva na površini;  $R$  - radijus dejstva eksplozije u stijenskoj masi). Kada je ovaj odnos manji od jedinice lijevak je umanjen, a kada je odnos veći od jedinice mina je pojačana.

Učinak mine bitno zavisi od slobodnih površina tj. pravaca u kojim je moguće odbaciti stijensku masu pod dejstvom eksploziva. Generalno se može reći da što je više slobodnih površina-pravaca za odbacivanje učinak mine će biti veći. U tunelogradnji se uglavnom sreću tri tipa pristupačnosti:

- a) Jednostrana pristupačnost, koja se javlja kada se minira čitavo čelo iskopa. Ova situacija je obilježena kao slučaj (a) na slici 5.4.
- b) Dvostrana pristupačnost je tipična, ukoliko se prvo izvrši iskop kalote (jedostrana pristupačnost), a potom se vrši iskop stepenice u cijelini. Pri iskopu stepenice se javlja dvostrana pristupačnost, na *sl. 5.4*. označena kao (b). Pri miniranju stijena se može odbaciti u pravcu ose tunela (površina 1) i naviše (površina 2).

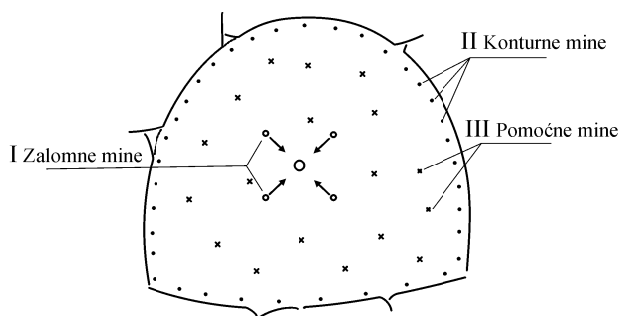
- c) Trostruka pristupačnost se može ostvariti, ako se iskop kalote vrši u dva »koraka«. U drugom »koraku« se ostvaruju tri površine, odnosno tri pravca u kojim je moguće odbacivanje stijene, slučaj (c) na sl. 5.4.



Sl. 5.4. Pristupačnost stijene za miniranje

### Optimizacija miniranja

U cilju optimizacije miniranja u jednom ciklusu miniranja (jednom poprečnom profilu) mine se aktiviraju u određenom redosledu tako da se obezbedi što više slobodnih površina pristupačnosti. Osnovni princip pri tome je da se aktiviranjem jedne mine otvara sljedeća površina pristupačnosti za sljedeću minu. Kako se na početku procesa, sukcesivnog otvaranja novih površina, uglavnom mora otpočeti sa jednom površi pristupačnosti to se i mine shodno ulozi koju imaju dijele na: zalomne, pomoćne i konturne (sl. 5.5).



Sl. 5.5. Vrste mina pri miniranju u tunelima

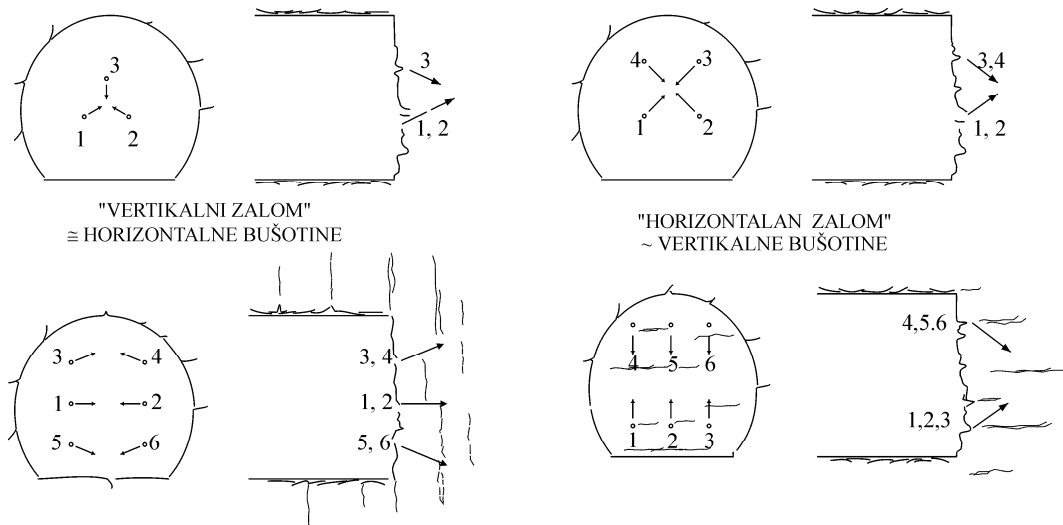
**Zalomne mine** imaju zadatak da »otvore« usku zonu stijenske mase u središtu čela iskopa (vidi sliku 5.5.) i time pored čeone slobodne površine obezbijede novu slobodnu površinu pristupačnosti oblika cilindra, kupe ili zaobljene piramide. Osnovni princip formiranja zalomnih mina je da se pozicioniraju što upravnije u odnosu na ravan ispucalosti. Na slici 5.6. prikazano je nekoliko karakterističnih načina formiranja zalomnih mina. Pored prikazanih vrsta zaloma postoji još desetak mogućih načina za formiranje zalomnih mina.

**Pomoćne mine** služe da razlome, usitne i odbace stijensku masu iz potrebnog profila tunela. Ove mine počinju da se aktiviraju oko pola sekunde nakon aktiviranja zalomnih mina. Ova vremenska zadržka treba da obezbijedi odbacivanje stijene iz zaloma i oslobađanje nove slobodne površine za odbacivanje stijene. Same pomoćne mine se postavljaju oko zaloma u koncentričnim krugovima



približno jednakih rastojanja. Aktiviranje pojedinih »krugova« pomoćnih mina se vrši sa zadržkom od 4-6 milisekundi. Zadržka u aktiviranju pojedinih mina se postiže postavljanjem polisekundnih i milisekundnih usporivača.

#### KOS PIRAMIDALNI ZALOM U HOMOGENOJ STIJENI



**Sl. 5.6.** Vrste zalomnih mina

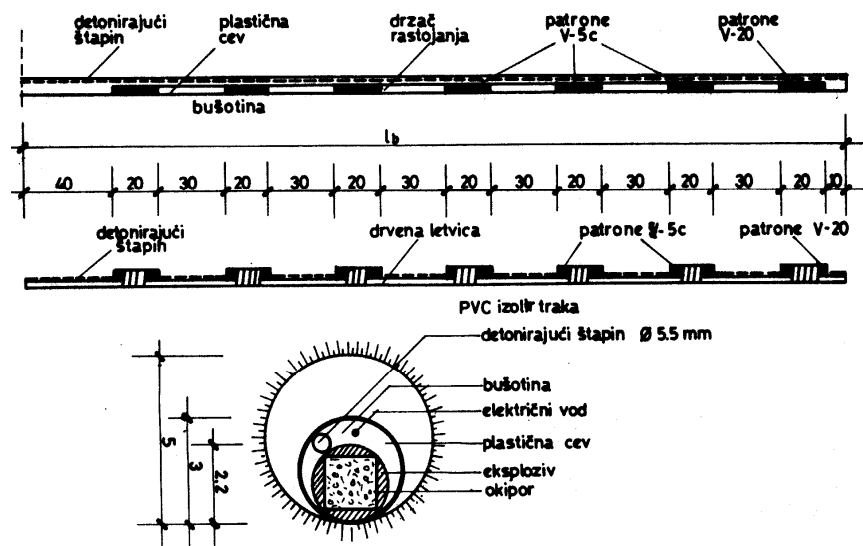
**Pomoćne mine** služe da razlome, usitne i odbace stijensku masu iz potrebnog profila tunela. Ove mine počinju da se aktiviraju oko pola sekunde nakon aktiviranja zalomnih mina. Ova vremenska zadržka treba da obezbijedi odbacivanje stijene iz zaloma i oslobađanje nove slobodne površine za odbacivanje stijene. Same pomoćne mine se postavljaju oko zaloma u koncentričnim krugovima približno jednakih rastojanja. Aktiviranje pojedinih »krugova« pomoćnih mina se vrši sa zadržkom od 4-6 milisekundi. Zadržka u aktiviranju pojedinih mina se postiže postavljanjem polisekundnih i milisekundnih usporivača.

**Konturne mine** se pozicioniraju po konturi budućeg otvora i imaju ulogu da se stijenska masa otkine po projektovanoj konturi, i da se pri tome što manje ošteti stijenska masa izvan projektovane konture.

Ukoliko se aktiviranje konturnih mina izvrši prije aktiviranja zalomnih i pomoćnih mina, govori se o metodi miniranja pod nazivom »pre splitting«. Ovaj metod se najčešće koristi pri masivnim površinskim miniranjima gdje se ovim putem obezbjeđuju manji potresi pri miniranju jer je zona miniranja odvojena pukotinom od ostatka stijeske mase.

U tunelima se uglavnom koristi tzv. metoda glatkog miniranja gdje se prvo aktiviraju zalomne, potom pomoćne, a na kraju konturne mine. Ovim redoslijedom aktiviranja mina postiže se glatka kontura otvora (relativno u odnosu na druge metode), pa otuda i naziv glatko miniranje.

**Punjene mina eksplozivom** se vrši patronama eksploziva težine 100-500g, i različito je za različite tipove mina. Minske bušotine zalomnih mina se uglavnom čitavom dužinom pune eksplozivom, osim pedesetak centimetara pri čelu iskopa koje se obično pune mekim glinovitim materijalom, u cilju što efikasnijeg korišćenja eksploziva. Minske bušotine pomoćnih mina se pune eksplozivom od dna ka čelu iskopa i eksploziv je obično koncentrisan pri dnu bušotine. Konturne mine se pune patronama eksploziva prečnika 2-2.5 puta manjeg od prečnika bušotine. Patrone eksploziva se postavljaju na preskok (patrona, prazna bušotina u dužini patrone, patrona itd.) počev od dna bušotine ka čelu iskopa. Susjedne konturne bušotine se pune tako da se na mjestu patrone susjedne bušotine nalazi praznina i obrnuto, na mjestu praznine patrona (sl. 5.7). Ovim se postiže da se pri aktiviranju konturnih mina, dobije efekat smicanja u pravcu konture otvora tunela.



Sl. 5.7. Način punjenja konturnih mina

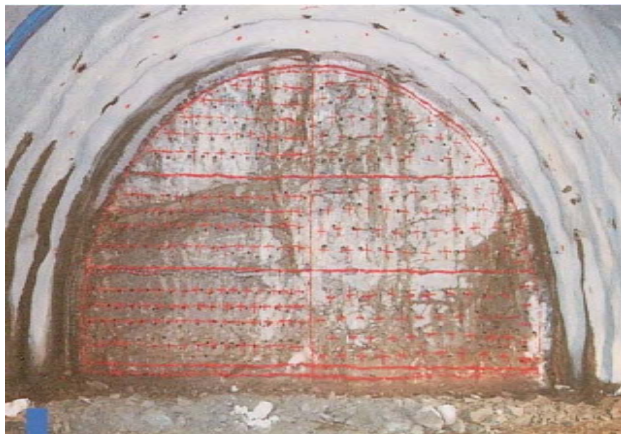
Količina eksploziva koja se postavlja u pojedine grupe mina zavisi od čvrstoće stijenske mase, ispuicalosti, veličine poprečnog presjeka tunelskog otvora, dužine napredovanja (bušenja bušotina), prečnika bušotina, vrste eksploziva itd. Specijalisti za miniranje pri određivanju potrebne količine eksploziva koriste empirijske formule i dijagrame za određenu vrstu eksploziva kako bi se na prihvatljiv način obuhvatili svi uticajni faktori na efekte miniranja. U toku miniranja se sagledavaju postignuti efekti, i po potrebi koriguju količine eksploziva u pojedinim tipovima mina (zalomne, pomoćne i konturne), kako bi se postigli željeni efekti miniranja.

### 5.1.3. Tehnologija i mehanizacija za izvođenje miniranja u tunelogradnji

Miniranje kao metod za iskop tunela, predstavlja cikličan proces u kom se odvijaju sljedeće glavne aktivnosti:

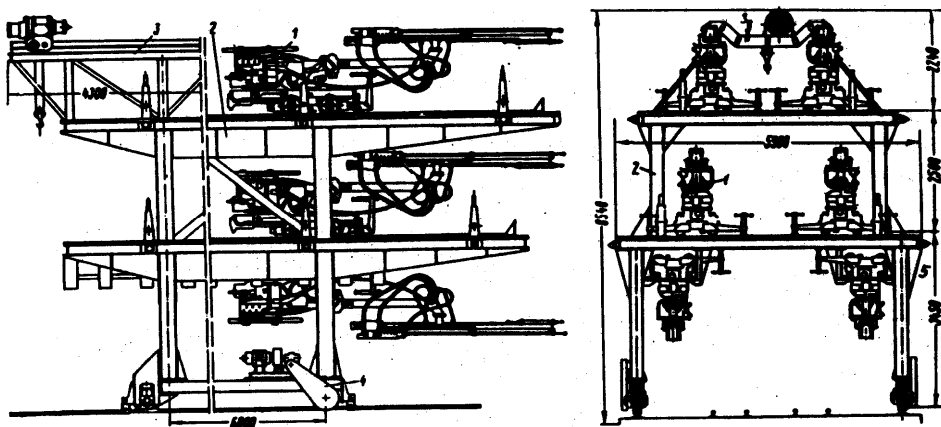
- obilježavanje položaja pojedinih mina
- bušenje minskih bušotina
- punjenje minskih bušotina eksplozivom i povezivanje mina sa sistemom za aktiviranje
- aktiviranje mina (miniranje)
- ventilacija (odimljavanje i otprašivanje radne zone)
- utovar i odvoz odminiranog stijenskog materijala
- »kavanje« konture iskopa (skidanje labilnih komada stijene)

U procesu obilježavanja položaja mina presudnu ulogu ima geodetska ekipa koja na čelu iskopa obilježava mjesto svake minske bušotine kako je prikazano *sl. 5.8.* (farbanjem položaja mine na stijeni).



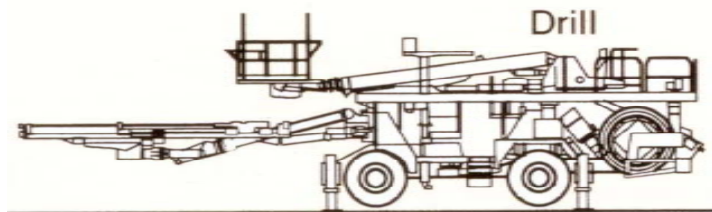
*Sl. 5.8. Obilježavanje položaja bušotina na stijeni*

**Bušenje minskih bušotina** oduzima najveći dio vremena u jednom radnom ciklusu. Samo sedamdesetak godina ranije ovaj posao je obavljan isključivo ručno, uz pomoć primitivnih alata. Uvođenjem bušačkog čekića ovaj fizički iscrpljujući posao je znatno olakšan, ali je i dalje ostao u dobroj mjeri manuelan. Prvi ozbiljan napredak je postignut proizvodnjom radne platforme tzv. »Jambo« platforme. To je bila čelična ramovska konstrukcija koja se kretala na šinama i bila je opremljena sa 6-8 fiksnih bušačkih čekića (*sl. 5.9.*), koji su istovremeno bušili minske bušotine.



*Sl. 5.9. »Jambo« platforma za bušenje sa šest bušačkih garnitura*

Značajan napredak u ovom procesu je načinjen proizvodnjom samohodnih bušaćih mašina na pneumaticima sa dvije bušaće garniture postavljene na hidraulički kontrolisanim »granama« (sl. 5.10). Modernije verzije ovih mašina imaju komande kontrolisane računarima i laserskim sistemima, tako da nije potrebno obilježavanje položaja mina. Brzina bušenja ovim mašinama je znatno ubrzana jer je rad dvije bušaće »garniture« sinhronizovan - dok jedna buši, druga grana se postavlja u položaj za bušenje.



**Sl. 5.10.** Samohodna bušaća mašina

**Punjenje minskih bušotina** se vrši ručno ili uz pomoć posebnih mašina za punjenje bušotina eksplozivom. Eksploziv se u fabrici ili na samom gradilištu pakuje u patrone odgovarajućeg prečnika i težine. Nakon punjenja, mine se povezuju u grupe koje se aktiviraju istovremeno a zatim sve zajedno do uređaja za aktiviranje. Danas se mine obično aktiviraju električnim detonatorima pa je uređaj za aktiviranje zapravo akumulator odgovarajućeg kapaciteta.

**Ventilacija nakon miniranja** pretsavlja neizostavan segment ciklusa. Odimljavanje se vrši forsiranim vještačkim uduvanjem svežeg vazduha u zoni čela iskopa. Za »transport« vazduha se koristi fleksibilno PVC crijevo prečnika 80-120cm. Ventilatori su skoro uvijek postavljeni izvan tunela, po jedan za svako napadno mjesto.

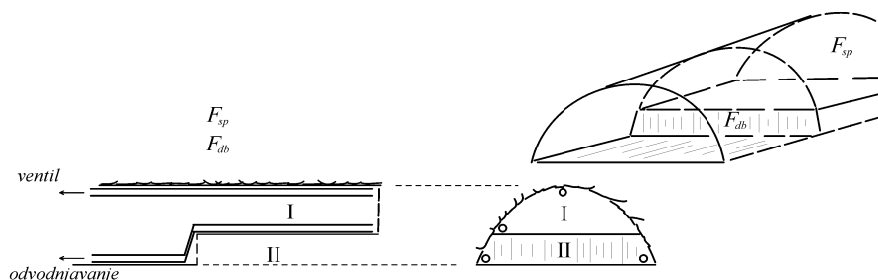
**Utovar i odvoz** odminirane stijene danas se gotovo redovno vrši tunelskim utovarivačima i tunelskim kamionima (oba na pneumaticima). Karakteristika tunelskih mašina ovog tipa je da su male visine i da su konstruisani tako da se mogu okrenuti na veoma malom prostoru.

**Kavanje** je skoro neizostavan dio procesa otkopa miniranjem. Naime, nakon miniranja, ma koliko bilo uspješno, na površini stijene postoji izvejstan procenat komada stijene koje je razlomljena, odvojenih od stijenske mase i potencijalno sklonih otpadanju. Ove komade stijene je moguće ručno ili uz primjenu hidrauličnih čekića, otkopnih kašika bagera i sl. odvojiti od stijene (»okavati«) i radni prostor učiniti bezbjednijim za rad.

U zavisnosti od kvaliteta stijene (čvrstoće stijene, pukotinskih sistema, i dr.), iskop miniranjem je moguće izvršiti iskopom tunelskog otvora u punom profilu sa čela ili podjelom iskopa profila na više nivoa (obično na kalotu i stepenicu).

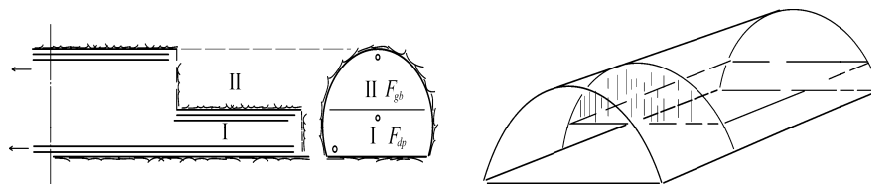
- a) Rad u punom profilu sa čela se obavlja u homogenoj stijenskoj masi površine 100-150m<sup>2</sup>.
- b) Rad u više nivoa može biti organizovan na više načina, u zavisnosti od uslova u stijenskoj masi i veličine porečnog profila.

b1) prvo iskop kalote (gornje berme), a zatim iskop stepenice (donje berme), kako je prikazano na slici 5.11. Povoljnost je u boljem uvidu u kvalitet stijenske mase, lakšem podgrađivanju kalote u lošijoj stijenskoj masi i boljem učinku pri iskopu stepenice.



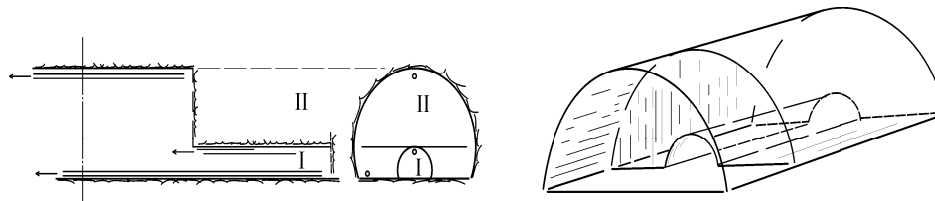
**Sl. 5.11. Iskop kalote pa stepenice**

b2) Iskop potkopa, a zatim iskop kalotnog dijela, kako je prikazano na slici 5.12. Ovakav način rada se može izvesti samo u vrlo stabilnoj stijenskoj masi. Povoljnost je u lakšem odvodnjavanju i izbjegavanju podgrade prve faze.



**Sl. 5.12. Iskop potkopa pa kalote**

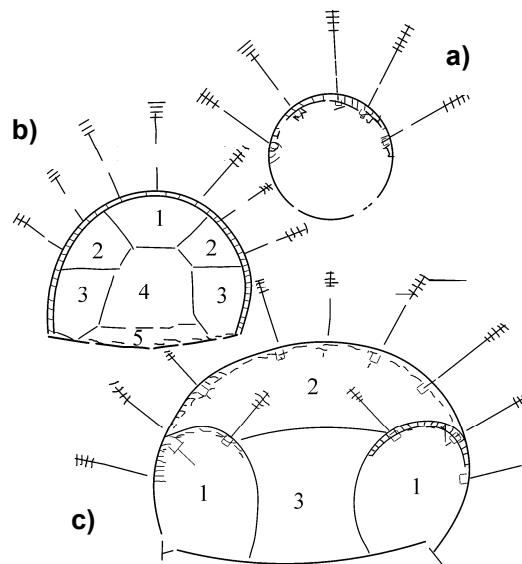
b3) Iskop sa pilot galerijom (sl. 5.13.) se izvodi za duže tunele. Prednost je što se nakon dovoljno dugog forsiranog iskopa pilot galerije mogu otvoriti još dva radna čela za iskop.



**Sl. 5.13. Iskop sa pilot galerijom**

## 5.2. Savremena podgradna konstrukcija – srednje teški tunelski iskopi (ankeri i sidra, prskani beton, armaturne mreže)

Iskop se vrši sistematskom primjenom otkopnih mašina u punom profilu (za prečnike iskopa koji su do oko 14m u prečniku, "TBM", *sl. 5.14.*) sa rotacionom otkopnom "glavom", ili sa postupnim iskopom u fazama za profile ovalnog ili elipsastog oblika, kada se koriste samohodne otkopne mašine ili samostalno ili u kombinaciji sa miniranjem kao pomoćnom operacijom. Podgrađivanje se vrši sukcesivno sa iskopom u fazama koje treba da su usklađene sa vremenom u kojem se izvršeni iskop održava u stabilnom stanju. Šematski prikaz podgrade kod tunela otkopanih primjenom TBM prikazan je na *sl. 5.14.a.*

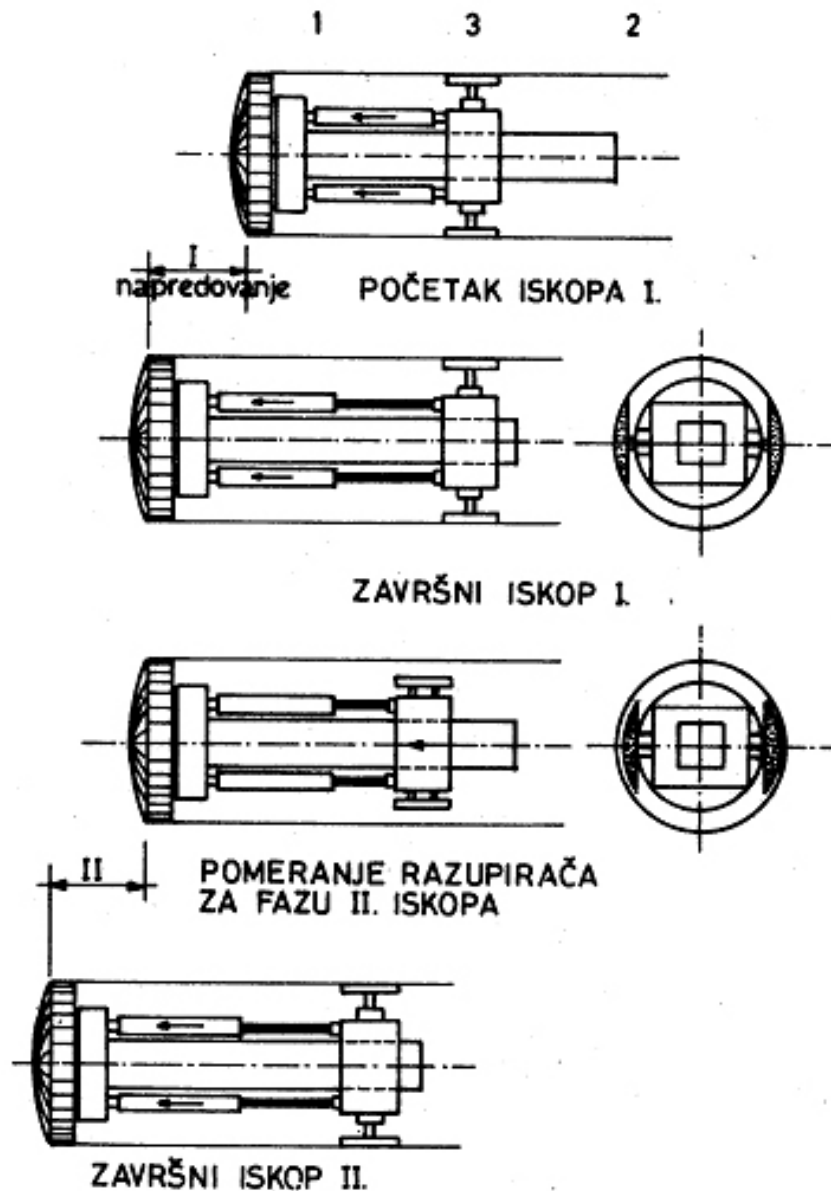


**Sl. 5.14.** Podgrađivanje  
prskanim betonom, armaturnim  
mrežama i ankerima

Kod iskopa u stijenama veoma niske kompetencije, otkopni profil je neophodno podjeliti na otvore manjeg raspona kod kojih je lakše obezbijediti stabilnost. Na *sl. 5.14.b* prikazana je razrada profila počev od kalote ka oporcima, dok je na *sl. 5.14.c* prikazan našin razrade profila od oporaca ka kaloti, što je više uobičajeno za NATM. Osiguranje narednih faza iskopa se vrši iz prostora koji je već podgrađen. Klasični način podgrađivanja sa primjenom poprečnih ramova (remenata) i podužnih limova ili "platica", praktično je zamjenjen podgradom od armiranog prskanog betona sa radialno postavljenim sidrima kojima se postiže formiranje "nosećeg prstena" stijenske mase koji u sadejstvu sa podgradom od prskanog betona (visoke početne čvrstoće) formira pouzdanu definitivnu podgradnu konstrukciju.

Kod primjene prskanog betona, armaturnih mreža i ankera, kao primarne nosive podgradne konstrukcije sastavni dio metodologije izgradnje je stalni monitoring ostvarenih deformacija, odnosno pomjeranja na konturi iskopa. Uobičajen naziv za mjerenje pomjeranja deformacija je mjerenje konvergencije, jer se u toku analize deformacija crtaju dijagrami pomjeranje-vrijeme koje, ukoliko je ostvaren balans sila između stijenske mase i podgradne konstrukcije, konvergira

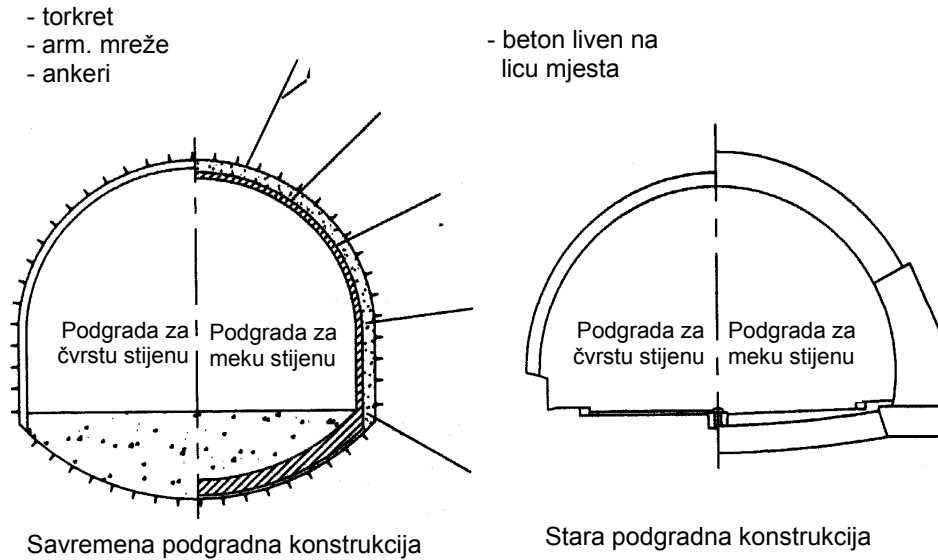
određenoj konačnoj vrijednosti. Kada pomjeranja ne konvergiraju ojačava se primarna podgrada dodatnim slojevima prskanog betona (torkreta), armaturnih mreža i ankera.



Sl. 5.15. Šema tehnološkog procesa izrade tunela pomoću rotacione mašine za iskop u punom profilu u čvrstim stijinama (TBM)

**NATM podgradna konstrukcija** od prskanog betona zbog preraspodjele napona u stijenskoj masi, povezane sa radijalnim defamacijama kao što je objašnjeno u dijelu 4.6.3, predstavlja racionalniju konstrukciju jer je stijenska masa primjenom ovog postupka preuzima znatno veće sile u odnosu na tradicionalno primjenjivanu oblogu od betona livenog na licu mjesta. Na sl. 5.16. prikazana je uporedo podgrada prema NATM i sa oblogom od livenog betona za čvrstu stijensku masu bez podnožnog svoda (lijevi dio crteža) i meku stijensku masu sa podnožnim svodom (desna strana crteža).

Jasno se uočava velika razlika u debljini podgrade (sl.5.16). Kod čvrste stijene podgrada po NATM je samo sloj prskanog betona ojačan armaturnim mrežama debljine 10-15cm, dok se debljina obloge od livenog betona kreće od 30-50cm. Kod mekih stijena ova razlika je znatno veća jer debljina obloge od livenog betona u kaloti dostiže 50-70 (90)cm, a u oporcima 1.5 do 1.8m (2.2).



**Sl. 5.16. Uporedni prikaz savremene (nove) i konzervativne (stare) podgradne konstrukcije**

### 5.2.1. Ankeri i sidra

**Ankeri i sidra** su jedan od ključnih nosivih elemenata kod primjene NATM. Ankeri preuzimaju 70-80% ukupnog radijalnog pritiska stijenske mase. U tunelogradnji se primjenjuju različiti tipovi sidara (ankera), ali se generalno mogu podjeliti na *pasivna*, za koje će se u ovom tekstu koristiti naziv *anker*, i aktivna *predhodnonapregnuta*, za koje će se u ovom tekstu koristiti naziv *sidra*. Ankeri se aktiviraju (počinju da prihvataju opterećenje), paralelno sa razvojem radijalnih deformacija konture tunelskog otvora, dok se kod sidara sila unosi presama (zatezanjem tijela sidra) i ona počinju da preuzimaju sile prije nego što se ostvarilo bilo koje pomjeranje konture iskopa.

**Ankeri za povezivanje sa kratkim sidrištem** - mehaničkom kotvom se mogu efikasno upotrebiti u čvrstim stijenskim masama. U zavisnosti od načina ukotvljenja, mogu se podjeliti na ankere sa klinastom i ekspanzionom kotvom.

- **Anker sa klinastom kotvom** je jednostavnije konstrukcije. Tijelo ankera je pri vrhu rasječeno tako da klin koji se oslanja na dno bušotine pri udarima malja širi tijelo ankera, kako je prikazano na sl. 5.17. Tijelo ankera se u zoni rascjepa opire o zidove bušotine, i na taj način postiže sidrenje ankera.



- **Anker sa ekspanzionom kotvom** funkcioniše na principu metalnog tipla. Na tijelu ankera je pri vrhu narezan spoljašnji konusni navoj na koji se postavlja kotva koja ima unutrašnji konusni navoj. Okretanjem tijela sidra oko podužne ose dolazi do širenja kotve koja se opire o stijensku masu, kako je prikazano na sl. 5.18.



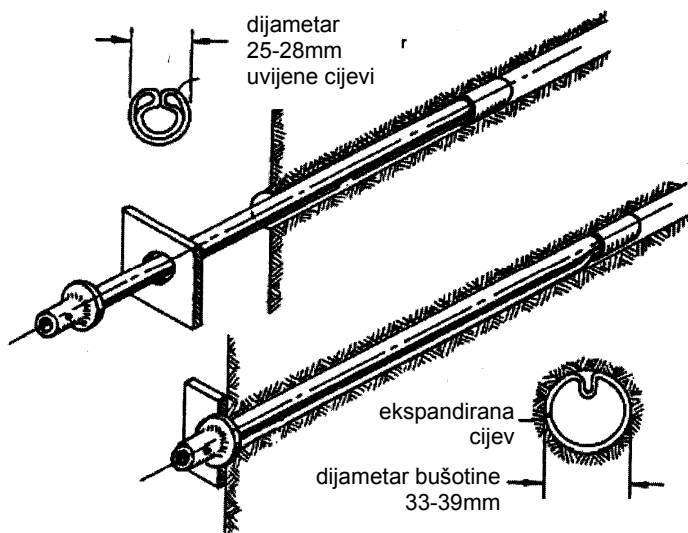
Sl. 5.17. Anker sa klinastom kotvom



Sl. 5.18. Anker sa ekspanzionom kotvom

**Ankeri za povezivanje sa dugim sidrištem** kontakt sa stijenskom masom ostvaruju gotovo na čitavoj dužini tijela ankera.

**Sidro tipa »Swelex«** kontakt sa stijenskom masom ostvaruje suvim trenjem između tijela sidra, koje je cjevasto, sl. 5.19. Tijelo sidra se proizvodi deformisanog oblika sa podužno utisnutim žlijebom. Po postavljanju u bušotinu tijelo ankera se povezuje sa kompresorom i podvrgava visokom unutrašnjem pritisku. Unutrašnji pritisak ispravlja deformisani oblik cijevi, posmatrano u porečnom presjeku, i pri tome se povećava radijus. Time se ostvaruje pritisak između tijela ankera i stijenske mase sa spoljne strane. Sidra ovog tipa su privremena i koriste se za brzo »fiksiranje« nestabilnih djelova stijenske mase. Kako vremenom dolazi do gubitka pritiska anker-stijena, to se za obezbjeđenje trajne stabilnosti koriste druge mjere.



Sl. 5.19. Swelex anker

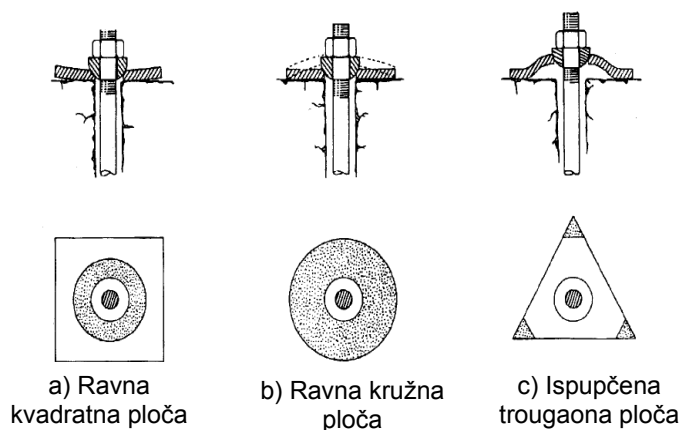
**SN anker** se najčešće koristi u tunelogradnji zbog jednostavne konstrukcije, jednostavne tehnologije izvođenja i dobrih efekata (sl. 5.20). Tijelo SN ankera se proizvodi od običnog građevinskog čelika (rjeđe od čelika boljeg kvaliteta – čvrstoće), prečnika 19-36mm (rijetko izvan ovih granica). Bušotina za anker se prvo napuni cementim malterom (gustom injekcionom masom), a tijelo sidra se zatim utisne u bušotinu, tako da dio ankera sa navojem ostane izvan stijenske mase. Nakon očvršćavanja maltera postavlja se čeona ploča i izvrši se zatezanje navrtke.



Sl. 5.20. SN anker

**IBO anker** se odnedavno šire koristi u tunelogradnji. Tijelo IBO ankera se proizvodi od posebnog čelika u obliku debele cijevi prečnika 32-44mm. Tijelo ankera je čitavom dužinom proizvedeno sa debelim navojem spolja i mogućnošću da se dvije šipke (obično dužine 3 ili 6mm) međusobno spoje na krajevima formirajući anker dužine i do 18m. Na vrh sidra se postavlja krunica za bušenje tako da je tijelo ankera istovremeno alat za izvođenje bušotine. Nakon završetka bušenja, kroz tijelo ankera se vrši injektiranje koje obezbjeđuje kontakt tijela ankera i stijenske mase.

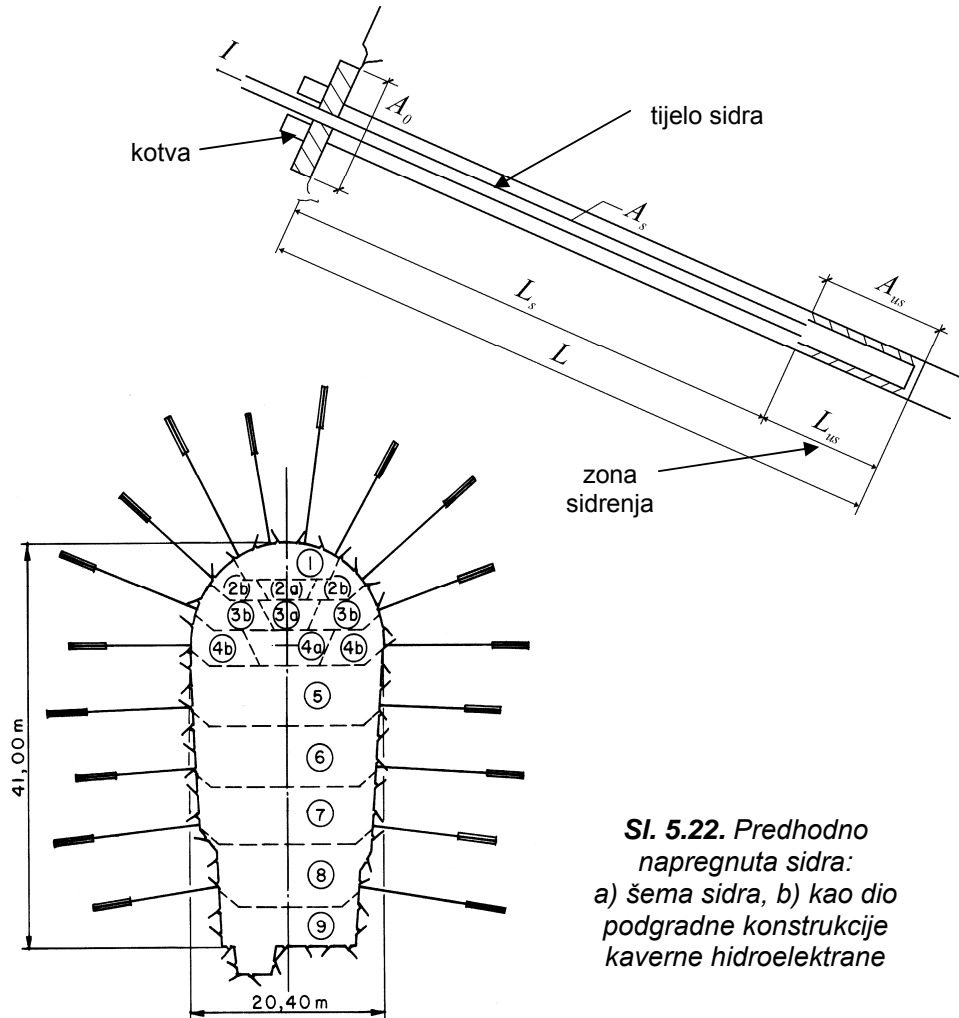
IBO ankeri se najčešće koriste u situacijama kada nije moguće izvesti bušotinu u stijeni, a da ne dođe do njenog zarušavanja ili zaglavljivanja alata za bušenje. IBO ankeri su 2-3 puta skuplji od SN ankera, ali u teškim uslovima postavljanja SN ankera, računajući troškove ponovljenih bušenja za postavljanje SN ankera, predstavljaju, ukupno, ekonomičnije rješenje. Povoljnost ankera ovog tipa je i u tome što se može izvesti anker proizvoljne dužine. Nakon ugradnje tijelo ankera se jednostavno skрати i potavi ploča i zavrtnanj.



Sl. 5.21. Podložne ploče

**Podložna ploča ankera** se izrađuje od čeličnih limova debljine obično 8-20mm. Na slici 5.21. su prikazani najčešće upotrebljavani oblici podložnih ploča. Uloga podložne ploče je da silu koju prenosi zavrtnanj ankera rasporedi na veću površinu stijene. Pored ovoga, podložna ploča ima ulogu da obezbijedi izvjesne deformacije slobodne konture stijene prije nego što anker preuzme maksimalnu silu, kao što je prikazano na slici 5.21.c.

**Sidra za prednaprezanje** se obično izvode u uslovima velikih poprečnih profila podzemnih objekata posebne namjene, a vrlo rijetko u tunelima saobraćajne namjene. Tijelo sidra su zapravo čelična užad koja se ugrađuju u bušotinu, a sidrena zona se ostvaruje injektiranjem cementim injekcionim masama, na dužini sidrenja  $L_{us}$  (sl. 5.22).



**Sl. 5.22.** *Predhodno napregnuta sidra: a) šema sidra, b) kao dio podgradne konstrukcije kaverne hidroelektrane*

Nakon očvršćavanja injekcione mase, presama se vrši zatezanje čeličnih užadi do projektovane sile, i zaklinjavanjem užadi u kotvi koja se oslanja na slobodnu površinu stijenske mase. Nakon ovoga se vrši injektiranje ostatka bušotine u cilju antikorozivne zaštite čeličnih užadi.

### 5.2.2. Prskani beton (mlazni beton, torkret)

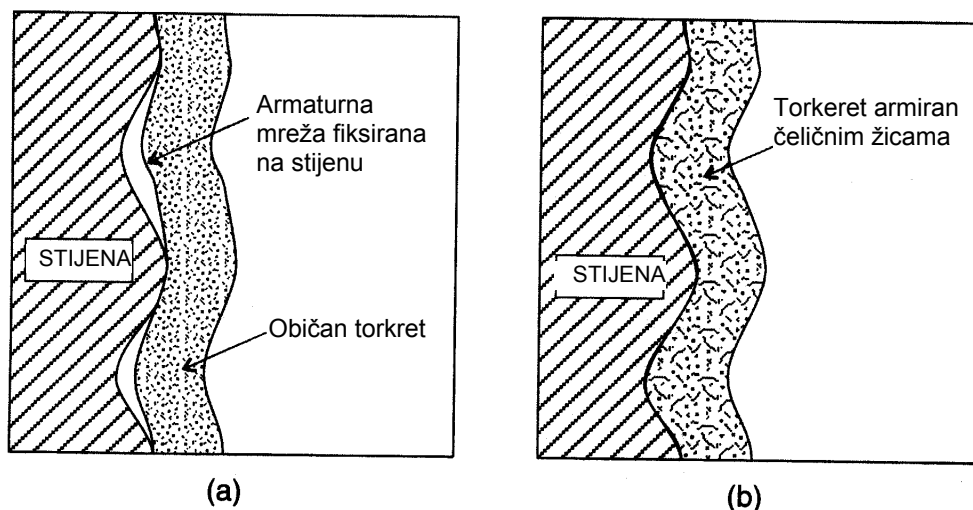
Postoje dva tehnološka postupka izrade prskanog betona: suvi i mokri postupak. Kod oba postupka torkret se na površinu stijene nanosi pod pritiskom uz primjenu mlaznice. Usmjeravanjem i pokretanjem mlaznice, na rastojanju od 1-1.5m od stijene, duž površine na koju se nanosi beton, sloj po sloj se izvodi željena debljina prskanog betona. Pri nanošenju torkreta uvijek postoji jedan dio izgubljene mase koja otpadne pri nanošenju u vidu odskoka (odbijanja), a jedan dio otpadne

ubrzo nakon nanošenja. Procenat gubitka dopremljene mase može dostići i 30%. Da bi se obezbjedilo da beton ne otpadne sa stijenske površine, u torkret se dodatju aditivi za ubrzavanje vezivanja (akceleratori), koji imaju i značajan efekat na što brže postizanje nosivosti obloge od torkret betona (svega nekoliko sati do preuzimanja pritiska stijenske mase).

**Suvi postupak** izrade podrazumjeva pripremu suve betonske mješavine u fabrici betona (pripreme se sve komponente osim vode). Mješavina se doprema na gradilište i ubacuje u torkret mašinu ( uz dodavanjem obično praškastih akceleratora) koja ovu suhu mješavinu pod pritiskom vazduha velikom brzinom »gura« kroz crijeva do mlaznice (nalik široj mlaznici za gašenje požara) u kojoj se preko posebnih ventila dozira količina vode pod pritiskom, tako da iz mlaznice »ističe« vlažna betonska mješavina.

**Mokri postupak** izrade podrazumjeva pripremu betonske mješavine u fabrici betona, koja se mikserima doprema na gradilište. Tečni akcelerator se dodaje-dozira direktno u mlaznici. Primjenom robotizovanih torkret mašina i mokrog postupka mogu se postići mnogo veći učinci u odnosu na suvi postupak. Prednost suvog postupka je kod malih količina radova gdje suva betonska mješavina može biti dopremljena na gradilište i po potrebi korišćenja u toku dana.

**Armiranje torkreta** se vrši običnim armaturnim mrežama koje se fiksiraju za stijensku masu, a zatim se vrši torkretiranje *sl. 5.23.a*. U novije vrijeme se dosta koristi mikroarmirani beton. U toku spravljanja betonske mješavine u mješalici se doda po projektu određena količina kratkih komada čelične žice (dužine do 5cm i debljine oko 1mm). Kada se ovako pripremljena mješavina nanese na stijenu komadi žice su ravnomjerno rasoređeni u masi, što značajno doprinosi povećanju zatežuće čvrstoće i duktiliteta torkreta (*sl. 5.23.b*). Prednost mikroarmiranog betona je što je postupak nanošenja brži (ne postavlja se klasična armatura) i brže se postiže potrebna zatežuća čvrstoća, a mana je što vremenom gubi kvalitet zbog korozije čeličnih žica.

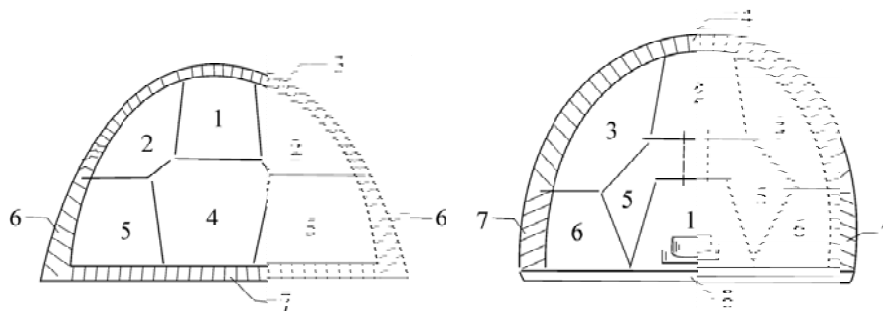


**Sl. 5.23.** Torkret armiran klasičnom armaturnom mrežom (a) i armiran čeličnim žicama (b)



### 5.3.1. Iskop odozgo naniže i betoniranje odozgo naniže

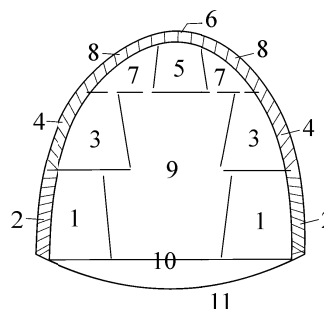
Ovakav način rada je primjenjivan u uslovima pouzdanog oslanjanja izbetoniranog kalotnog dijela obloge. Na ovoj osnovi, uz izvjesne specifičnosti razrade profila razvijene su: belgijska, Njemačka i Italijanska metoda. Na *sl. 5.26.* prikazana su šematski dva načina razrade profila odozgo naniže.



**Sl. 5.26.** Šematski prikaz razrade profila odozgo naniže

### 5.3.2. Iskop i izrada obloge po perimetru odozdo naviše

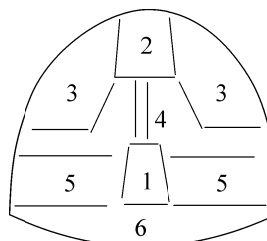
Način izrade odozdo naviše primjenjuje se kod mekih stijena zasićenih vodom i kod velikog popečnog presjeka podzemnog otvora. Kod ove metode, koja je šematski prikazana na *sl. 5.27.*, moguće je koristiti centralno jezgro (na slici označeno sa 9) za oslanjanje privremene podgrade u toku iskopa i oslanjanje oplata za betoniranje.



**Sl. 5.27.** Šematski prikaz razrade profila odozdo naviše

### 5.3.3. Iskop odozgo naniže i betoniranje odozdo naviše

Iskop odozgo naniže i betoniranje odozdo naviše primjenjuje se kod čvrstih stijena sa malim pritiskom. *sl. 5.28.* Na ovom redosledu razrade se zasnivaju Austrijska i Engleska metoda izrade. Centralni potkop »1« se koristi za odvoz materijala i lakši utovar kroz otvor koji vodi od kalotnog potkopa »2« do potkopa »1«.

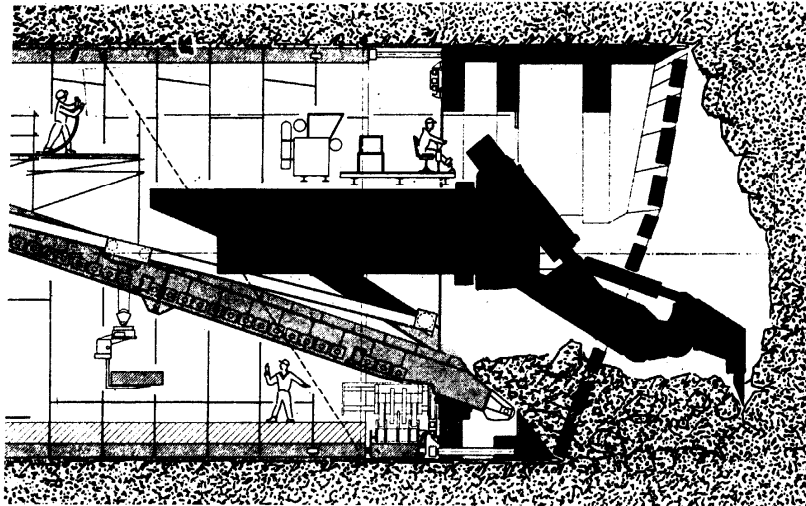


**Slika 5.28.** Šematski prikaz razrade iskopa odozdo naviše i betoniranje odozgo naniže

#### 5.4. Primjena otvorenog i zatvorenog štita i montažne podgradne konstrukcije - teški i vrlo teški tunelski iskop

Iskop sa primjenom mehanizovanog štita vrši se u tlu ili u stijenama male čvrstoće kod kojih pritisna čvrstoća monolita nije veća od 2 do 5 MPa, i gdje postoji nepovoljno delovanje podzemne vode.

Podgradna konstrukcija se, po pravilu, sastoji od montažnih elemenata (tjubinga), a otkopna mašina je najčešće "krtica" tj. mašina sa cilindričnim čeličnim štitom i otkopnim sistemom koji može biti sa: mehhanikom otkopnom granom i kašikom, rotacionom glavom u punom profilu, a po potrebi, sa "prislonjenom glavom" na čeonu površinu iskopa, čime se postiže kontrolisano i uskladjeno pomijeranje štita sa količinom otkopanog tla i izbjegava slijeganje površine terena iznad trase tunela.



*Sl. 5.29. Šema tehnološkog procesa izrade tunela pomoću štita i mehaničkog uređaja za kopanje*

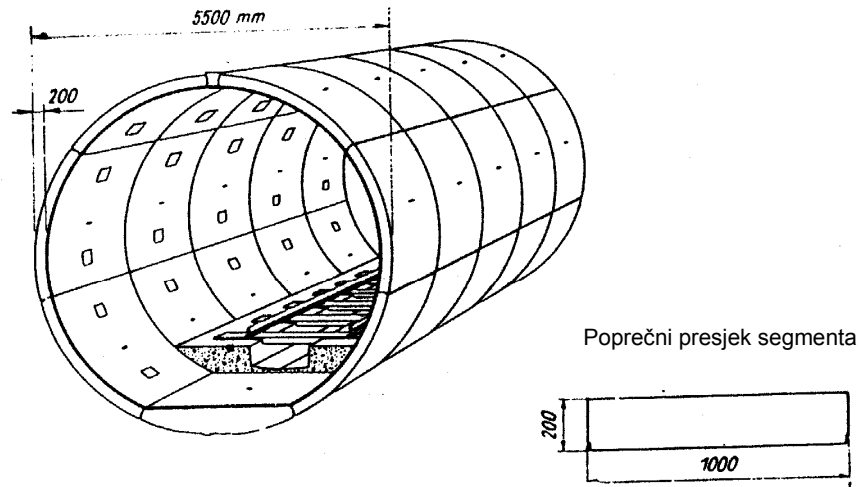
Rad na iskopu je cikličan. U prvom koraku cilindrični čelični štit se hidrauličnim sistemom, koji se opire o montažnu podgradu, potiskuje naprijed i utiskuje u meku stijensku masu za dužinu montažnog segmenta (1-1.5m, ređe više). Nakon ovoga se vrši iskop stijenskog materijala uz sukcesivno odvoženje materijala i postavljanje montažne podgrade. Kod mašina za rad u vrlo mekom tlu zasićenom vodom (rotacionom glavom u punom profilu) proces utiskivanja štita i otkopa materijal se vrši istovremeno.

Treba napomenuti da se danas praktično svaka mašina ovog tipa proizvodi namjenski za određene geološke i druge uslove. Ovo praktično ima za posledicu da je svaka nova mašina proizvedena kao unikat sa novim tehničko-tehnološkim rješenjima. U ovoj oblasti unapređenja su stalna zbog permanentne potrebe za efikasnijim radom, savlađivanjem sve lošijih geoloških uslova (koji su ranije izbjegavani) i smanjenja ukupnih troškova i vremena građenja.





oblozi znatno redukovao. Segmenti obloge se obično proizvode u fabrici koja se instalira u neposrednoj blizini tunela. Kako je potrebno proizvesti veliki broj segmenata primjenjuju se različite metode ubrzanja vezivanja betona (aditivi, zaparivanje i dr.), kako bi se segment mogao što prije izvaditi iz kalupa. Obično je potrebno između 8 i 10 sati da se proizvede jedan segment obloge od armiranog betona.



**Sl. 5.31.** Prefabrikovana armirano betonska obloga primjenjena u Moskovskom metrou 1962.god.

#### 5.4.2. Monolitizacija montažne podgrade

Finalizacija podgradne konstrukcije se vrši simultanim injektiranjem cijelog perimetra iskopa tj. zazora između površine iskopa i montažnih elemenata, čime se postiže njihova monolitizacija. Za injektiranje se primjenjuje cementna injekciona masa. Ukoliko se pojavljuju veći zazori moguće ih je prvo popuniti pjeskovitim materijalom, a zatim vršiti injektiranje.

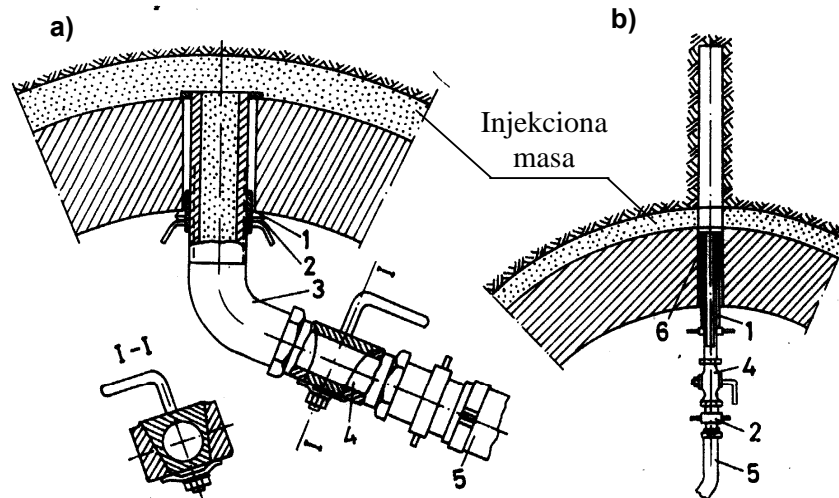
Kada je neophodno postaviti hidroizolaciju onda se obično sa unutrašnje strane ovako izvedene podgradne konstrukcije izvodi još jedan sloj obloge od livenog betona, koji ima ulogu da štiti hidroizolaciju od oštećenja i požara, a sa druge strane obezbjeđuje se noseća konstrukcija za opremu tunela, kao što su ventilatori, svjetiljke i sl.

#### 5.5. Injektiranje u tunelima

Injektiranje je utiskivanje injekcione mase, koja je po sastavu suspenzija-rastvor: vode, cementa i različitih dodataka. Injektiranje se u tunelogradnji vrši radi:

- a) zapunjavanja zazora između obloge i stijenske mase, i
- b) zapunjavanja šupljina u samoj stijenskoj masi.

Zapunjanjem zazora između obloge i stijenske mase postiže se bolje sadejstvo obloge i stijenske mase, ravnomjerniji pritisci na oblogu, smanjuje se vodopropustljivosti i dr. Bušotina za ovo injektiranje prodire samo kroz oblogu tunela (sl. 5.32.a). Zapunjavanjem šupljina u samoj stijenskoj masi postižu se bolje fizičko mehaničke osobine stijenske mase i tada se bušotina produžava do željene zone u stijenskoj masi (sl. 5.32.b). Ukoliko se injektiranje između obloge i stijenske mase vrši pod visokim pritiskom, onada se postižu efekti predhodnog naprezanja obloge (ovo je važno kod hidrotehničkih tunela pod pritiskom).



Sl. 5.32. Šema injektiranja: 1 - otvor u oblozi, 2 - muf, 3 - cijev, 4 - ventil, 5 - crijevo, 6 - gumeni zaptivač (2, 3, 4 ima naziv »paker«)

Postupak injektiranja je cikličan i sastoji se od sljedećih ključnih aktivnosti:

- bušenje obloge (ako nije izveden otvor u toku izvođenja obloge)
- ispiranje bušotine vodom
- postavljanje pakera
- testiranje vodopropustljivosti
- priprema smješe za injektiranje
- utiskivanje injekcione mase (smješe) pod pritiskom
- održavanje pritiska do očvršćavanja injekcione mase

**Injekciona masa** se sastoji od mješavine vode, cementa i aditiva za poboljšanje pojedinih osobina (ubrzivači, plastifikatori i sl.) i inertnih dodataka za pojeftinjenje radova (dodaje se pijesak, mljeveni agregat - filer i sl.). Injekciona masa se priprema u posebnim mašinama – injektorima, koji se sastoje od: posude za mješanje, rezervoara gotove injekcione mase, kompresora za utiskivanje mase pod pritiskom (klipnog ili pužnog potiskivača), crijeva za transport i pakera.

U zavisnosti od svrhe i efekata injektiranja u tunelogradnji se govori o četiri osnovne vrste, i to:

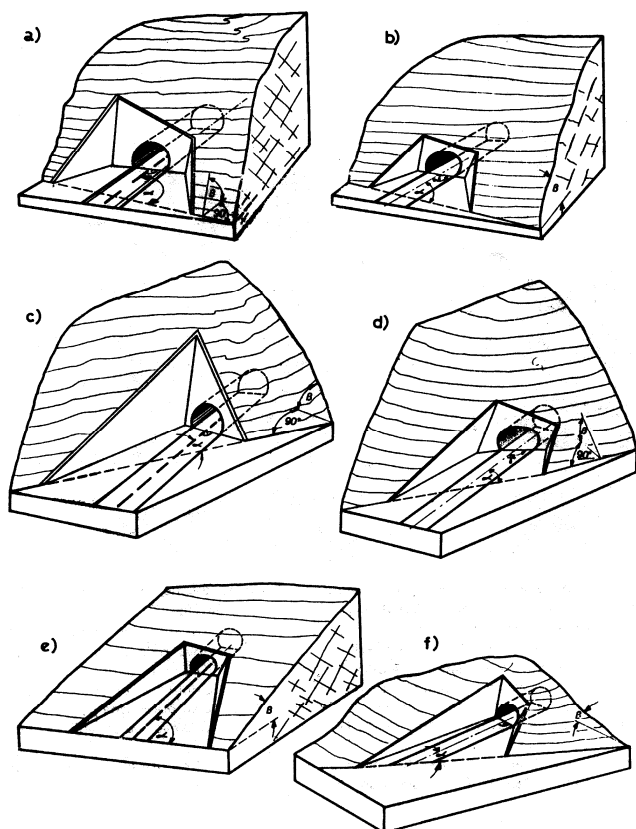
- a) **Kontaktno injektiranje**, koje predstavlja popunjavanje šupljina između obloge i stijenske mase. Pri ovom injektiranju utrošak injektione mase se kreće od 0.1 do 2m<sup>3</sup> po m<sup>2</sup> obloge. Za ovu svrhu se najčešće koriste guste injektione mase, odnosa osnovnih komponenti C:W=1:0.5 do 1:1 (C - cement, W - voda, P - pijesak) ili ako se koristi pijesak kao dodatak C:P:W=1:0.5:0.5; Pritisak injektiranja je  $p=3-4$ bara. Čvrstoća injektione mase nakon očvršćavanja  $\sigma_c=1-1.5$ MPa.
- b) **Vezno injektiranje**, koristi se za povezivanje u konstruktivnu cjelinu obloge i stijenske mase. Za ovu svrhu se najčešće koriste injektione mase odnosa osnovnih komponenti C:W=1:2 do 1:4. Pritisak injektiranja je oko 8 bara. Čvrstoća injektione mase nakon očvršćavanja  $\sigma_c=1-1.5$ MPa.
- c) **Konsolidaciono injektiranje**, se primjenjuje za poboljšanje mehaničkih karakteristika stijenske mase, prvenstveno dobijanje željenog modula deformabilnosti. Pri ovom injektiranju se koriste bušotine odgovarajuće dubine u stijenskoj masi. Za ovu svrhu se najčešće koriste injektione mase odnosa osnovnih komponenti C:W=1:2. Pritisak injektiranja je  $p \leq 2$ MPa. Čvrstoća injektione mase nakon očvršćavanja  $\sigma_c=1.5-2.0$ MPa se može ostvariti u stijenskim masama sa  $V_p > 2500$ m/s, tj. V i VI kategorije.
- d) **Naponsko injektiranje**, se primjenjuje kada je potrebno izvršiti prednaprezanje obloge, tj. kada je potrebo uvećati tangentne napone u u oblozi. Najčešće se ovaj vid injektiranja koristi kod hidrotehničkih tunela pod pritiskom, pa se efektom prednaprezanja »poništava« deystvo unutrašnjeg pritiska vode u tunelu u toku eksploatacije. Pritisak injektiranja je  $p > 3-4$ bara. Čvrstoća injektione mase nakon očvršćavanja  $\sigma_c \geq 5.0$ MPa.

Postupci injektiranja se mogu podjeliti u tri grupe:

1. **prosto** injektiranje sa brtvom u oblozi i injektiranjem čitave bušotine (brtva je gumeni zaptivač, vidi *sl. 5.32.b*).
2. **u etažama** sa brtvom u bušotini na željenoj dubini; ovim se postiže da se prvo injektira jedna zona bušotine, a zatim se pomjeranjem brteve vrši injektiranje ostatka bušotine.
3. **sa cirkulacijom mase** od injektora do bušotine i nazad do injektora. Ovim se postiže da se injektiona masa postepeno utiskuje u pore i šupljine bez mogućnosti sedimentacije u injektionalnoj masi. Sedimentacija može dovesti do začepjenja sistema za injektiranje i/ili kanala u stijenskoj masi, kroz koje teče injektiona masa, prije popunjavanja svih šupljina.

## 5.6. Portalne građevine

Portali su ulazni i izlazni djelovi tunelske konstrukcije. Portali imaju nekoliko osnovnih funkcija: u fazi eksploatacije obezbjeđuju stabilnost ulazne i izlazne zone; štite saobraćajnicu od odrona, lavina i vode; imaju arhitektonsko-estetsku ulogu.

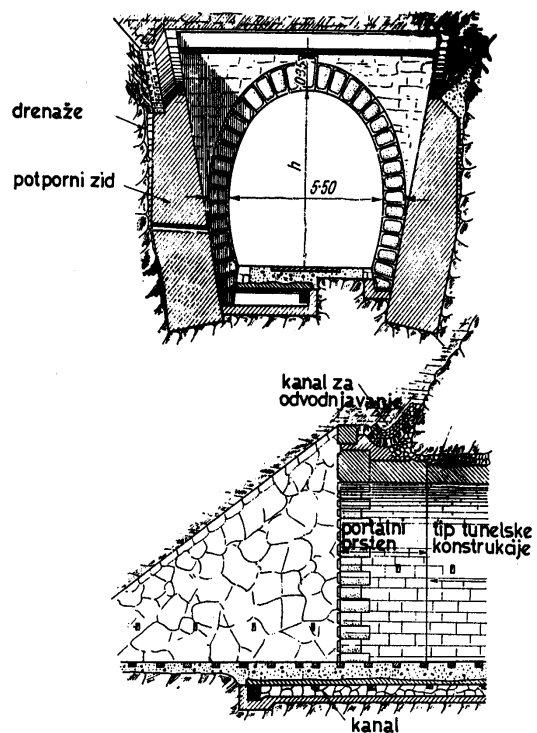


**Sl. 5.33.** Položaji portala (osovine tunela) u odnosu

Osnovni elementi portalne konstrukcije su portalni zid i portalna tunelska cijev. U zavisnosti od odnosa ose saobraćajnice (tunela) i nagiba padine u kojoj se formira portal mogu se pojaviti jedan ili dva bočna potporna portalna zida u usjeku.

Na *sl. 5.33.* prikazano je nekoliko karakterističnih slučajeva konstruisanja portala, u zavisnosti od ugla koji zaklapaju osa tunela (saobraćajnice) i linija presjeka brdske kosine i ravni saobraćajnice.

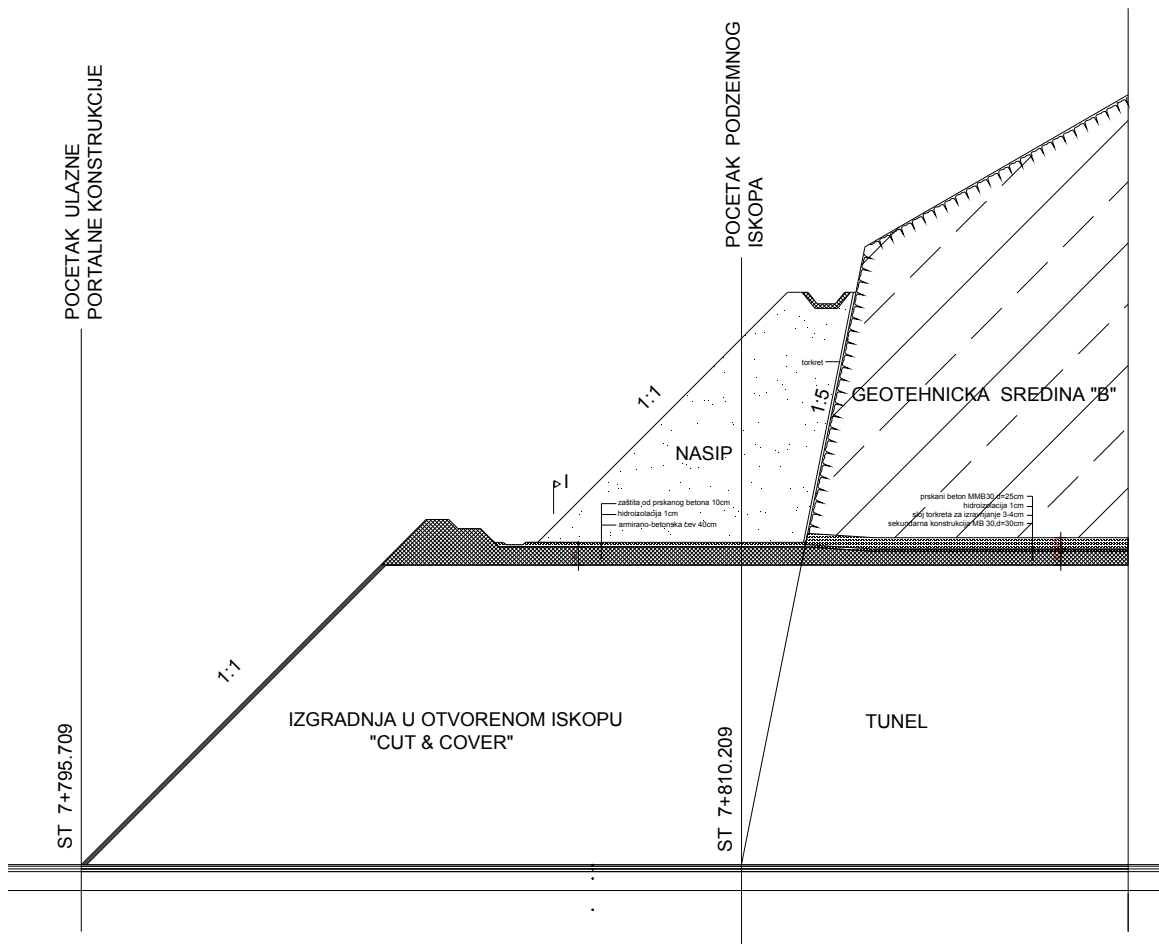
**Portalni zid** može biti konstruisan kao vertikalni ili zakošen (u odnosu na vertikalnu). Tradicionalni portalni zidovi, zidani od kamena ili opeke su redovno vertikalni, *sl. 5.34.* Od polovine prošlog vijeka portalni zidovi su, primjenom armiranog betona, počeli da odstupaju od ovog šablona, pogotovo na značajnijim tunelima, i poprimaju najrazličitije arhitektonsko-geometrijske forme.



**Sl. 5.34.** Portal sa ravnim (vertikalnim) zidom

**Tunelska cijev portala** se redovno izvodi u otvorenom. Kod starih tunela ova dužina je redovno minimizirana, katkada samo toliko koliko je tehnološki bilo potrebno za izvođenje portalnog zida (50-100cm). Dužina portalne tunelske cijevi generalno zavisi od nagiba padine i debljine degradirane zone stijenske mase (što je padina blažeg nagiba i debljina degradirane zone veća, to je dužina portalne tunelske cijevi veća).

**Metoda “cut & cover”** je danas uobičajena za izvođenje tunela u zoni portala. Nakon otkopa predusjeka tunela i izvođenja iskopa tunela, pristupa se podužetku tunelske cijevi, tako da je kosinu padine moguće vratiti u približno prvobitno stanje (sl. 5.35). Ovaj postupak podrazumjeva izgradnju tunelske cijevi u otvorenom, i nakon toga nasipanje u slojevima do postizanja željene geometrije. Ovaj postupak se uobičajeno naziva “cut & cover”. Cilj ovog rada je da se nakon završetka radova na kosini ne primjećuju bilo kakvi “tragovi” radova i izbjegne veliki vidljivi ožiljak u stijenskoj masi.



**Sl. 5.35.** Poprečni presjek portala po sistemu “cut & cover”



*Sl. 5.36. Portal sagrađen po sistemu "cut & cover"*

### **5.7. Sanacija i rekonstrukcija saobraćajnih tunela**

Veliki broj saobraćajnih tunela u Jugoslaviji izgrađen je u periodu od završetka drugog svjetskog rata do kraja sedamdesetih godina. Karakteristično je, za putne tunele izgrađene u ovom periodu, da su samo tuneli izgrađeni u lošijim stijenskim masama pograđeni klasičnom betonskom oblogom, dok su u boljim stijenskim masama ostali potpuno nepodgrađeni - bez obloge. Nakon 25-40 godina od završetka izgradnje na skoro svim tunelima, izgrađenim u ovom periodu, mogu se primjetiti ozbiljna oštećenja i degradacija stijenske mase kod nepodgrađenih i betonske obloge kod podgrađenih tunela. Jedan od osnovnih uzroka intenzivnih oštećenja je potpuno nedostajanje bilo kog vida hidroizolacije i loš kvalitet ugrađenog betona.

Onovu za izradu projekta sanacije čini projekat izvedenog stanja, snimak oštećenja i rezultati laboratorijskih ispitivanja. U našim uslovima često je nemoguće doći do projekta izvedenog stanja tako da je praktično u trenutku izrade snimka oštećenja neophodno provjeriti sve elemente konstrukcije bitne za izradu sanacije. Snimak oštećenja treba prvenstveno da sadrži: razvijeni podužni profil obloge tunela na kojem su ucrtana sva oštećenja (prsline, pukotine, degradirane zone betona, mjesta segregacije betona, zatim: mjesta prodora vode u obliku vlaženja, kapanja ili curenja i drugo). Laboratorijska ispitivanja obuhvataju ispitivanja fizičko mehaničkih karakteristika betona podgradne konstrukcije metodama sa i bez razaranja (čvrstoća, otpornost na mraz, vodopropustljivost itd) i ispitivanje hemijskog sastava podzemne vode (u pogledu agresivnosti na beton i dr.). Posebno je neohodno razmotriti stanje kolovozne konstrukcije u pogledu donjeg stroja, kolovoznog zastora i eventualnog prodora podzemne vode.

Pri rekonstrukciji nepodgrađenih putnih tunela neophodno je izvršiti proširenje tunela u cilju obezbjeđivanja saobraćajnog profila i dodatnog prostora za smještanje podgradne konstrukcije. Podgrađene tunele na magistralnim i regionalnim putevima i na željeznici karakteriše vrlo mali slobodni prostor između obloge i saobraćajnog profila. Obično je osnovni zadatak rekonstrukcije da se obezbjedi zadovoljavajuća nosivost oštećene podgrade i spriječi prodor vode u tunel. Dakle, intervencije na oblozi u pravcu dodavanja slojeva na postojeću oblogu su obično ograničene na 5 do 10cm, osim u samoj kruni tunela gdje je slobodni prostor nešto veći.

Skućenost prostora nameće sanaciona rješenja usmjerena na poboljšanje karakteristika materijala obloge, što se postiže različitim vrstama injektiranja. Injekciona masa popunjava pore i šupljine u postojećoj oblozi, pa sa jedne strane dovodi do poboljšanja mehaničkih karakteristika, a sa druge strane smanjuje vodopropustljivost obloge. Klasičan pristup izgradnje tunela, u naznačenom periodu, karakteriše postojanje manjeg ili većeg zazora između obloge i stijenske mase, naročito u kaloti tunela. Kontaktnim injektiranjem (kroz bušotine raspoređene ravnomjerno u šahovskom rasporedu po površini obloge, na rastojanju od oko 2.0m) postiže se zaštita obloge od agresivnog dejstva vode sa spoljašnje površine obloge. Unutrašnja (vidljiva) površina obloge se najčešće vrlo uspješno sanira i kasnije štiti slojem torkreta. Ukoliko je sloj torkreta veći od 4-5cm treba ga armirati mrežastom armaturom i za oblogu fiksirati ankerima. Rastojanje ankera je povezano sa nosivošću ankera i debljinom torkreta; ukoliko se radi o lokalnom oštećenju rastojanje ankera ne treba da je veće od 50cm, a kod kontinualnog saniranja obloge ne bi trebalo da pređe 1m, izuzetno kod debljih, dvostruko armiranih slojeva torkreta 1.5m.

## Literatura

1. Anagnosti P. *“Podzemne konstrukcije – deo I Projektovanje i građenje”*, Građevinski kalendar, str. 112-149, Savez Inženjera i Tehničara Jugoslavije, Beograd, 2004.
2. Anagnosti P., Tomanović Z. *“Podzemne konstrukcije – deo II Saobraćajni tuneli”*, Građevinski kalendar, str. 1-78, Savez Inženjera i Tehničara Jugoslavije, Beograd, 2005.
3. Bouvoard-Lecoanet i drugi, *Ouvrage souterrains; Conception – Relisation - Entretien*, Ponts et chaussees, 1988
4. Jeger J. i drugi, *Fundamentals of Rock Mechanics*, Blackwell, 2008.
5. Jovanović P. *“Izrada podzemnih prostorija velikog profila”*, Građevinska knjiga, Beograd, 1984.
6. Maksimović M. *“Mehanika tla”*, drugo izdanje, Čigoja štampa, Beograd, 2001.
7. Popović B. *“Tuneli”*, Građevinska knjiga, Beograd, 1987.
8. Singh B and Goel R. *Rock mass Classification*, Elsevier, 1999.
9. Singh B and Goel R. *Tunneling in weak Rock*, Elsevier, 2006.
10. Szechy K. *The Art of Tunneling*, 1973.
11. Tomanović Z. *“Tuneli i podzemne konstrukcije”*, neutorizovana predavanja, 2004.